



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**VYUŽITÍ ENERGIE KOMPOSTU PRO PŘÍPRAVU TEPLÉ  
VODY**

COMPOST HEATING SYSTEM FOR THE HOT WATER PREPARATION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bára Dokoupilová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jaroslav Bajko**

**BRNO 2017**



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Studentka: **Bára Dokoupilová**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Bajko**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Využití energie kompostu pro přípravu teplé vody

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Teoretická část této bakalářské práce je zaměřena na studium a využití energie, která se uvolňuje při humifikačních procesech v kompostu. Jedná se především o teplo vznikající činností edafonu při přeměně organické hmoty. V práci jsou diskutovány jak možnosti ohřevu vody pomocí kompostu, tak spolupráce na založení experimentálního kompostu pro energetické účely a získaná data z experimentu.

#### Cíle bakalářské práce:

- 1) Rešerše využití organické hmoty (biomasy) pro energetické účely, kompostování a způsobů přípravy teplé vody.
- 2) Spolupráce na založení kompostu pro energetické účely.
- 3) Zpracování a vyhodnocení dat naměřených v pilotním experimentu.

#### Seznam literatury:

PAIN I., PAIN J. The methods of Jean Pain: Another kind of garden, Draguignan: Ancienne Imprimerie NEGRO, 1972.


KARAFIÁTOVÁ K. Analýza moderních technologií ekologického kompostování, AF Mendelu, diplomová práce, 2010.


DE BERTOLDI M., VALLINI G., PERA A. The biology of composting: A review, Waste Management & Research, 1, 157-176, 1983.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 2. 11. 2016



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## Abstrakt

Tato práce se zabývá využitím energie vznikající při rozkladných procesech v organické hmotě. Představuje možnost odběru tepla z kompostu pomocí termálního reaktoru, uvádí kompostování do kontextu ekologie a globálního oteplování, vysvětluje biochemické procesy probíhající při rozkladu biomasy a objasňuje termomechanické principy přenosu tepla v termálním reaktoru. Cílem praktické části je vyhodnotit naměřená data a ověřit funkčnost termálního reaktoru sestaveného v pilotním experimentu. Výsledky potvrzují, že termální reaktor je schopen dodávat požadovaný výkon, avšak jeho životnost je úzce závislá na podmínkách prostředí kompostu. Klíčovým faktorem je nejen vhodně zvolená směs ke kompostování, ale i její tepelná izolace. V závěru práce jsou zmíněny již existující projekty založené na využití biomasy pro energetické účely.

## Klíčová slova

Termální reaktor, kompostování, biomasa, termofilní fáze, přenos tepla, tepelné ztráty

## Abstract

Using energy that is generated during decomposition processes in organic matter, is the fundamental theme of this thesis. While the following research succeeds to present the possibility of heat recovery using a compost heater, it also introduces composting in the context of ecology and global warming. The work analyses biochemical processes taking place in the decomposition of biomass, and explains the thermomechanical principles of heat transfer in the compost heater. The aim of the practical section of this work is to evaluate the measured data and verify the functionality of the compost heater assembled in the pilot experiment. The results confirm the compost heater is able to deliver the required power. However, its lifetime is closely dependent on the conditions of the compost environment. A key factor is not only a suitably chosen mixture for composting but also its thermal insulation. In the final section, examples of specific case studies based on the use of biomass for energy purposes, are presented.

## Key Words

Compost heater, composting, biomass, thermophilic stage, heat transfer, heat loss

## Bibliografická citace

DOKOUPILOVÁ, B. *Využití energie kompostu pro přípravu teplé vody*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Bajko.

## Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma „Využití energie kompostu pro přípravu teplé vody“ jsem vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 26. 5. 2017

.....  
Bára Dokoupilová



## Poděkování

Ráda bych touto cestou vřele poděkovala vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Jaroslavu Bajkovi za vstřícnost, odborné rady a také za možnost podílet se na pilotním experimentu stavby termálního reaktoru.

# Obsah

|   |    |
|---|----|
| Úvod.....   | 15 |
| 1 Termální reaktor .....                          | 16 |
| 1.1 Kompostování a globální oteplování .....      | 16 |
| 1.2 Kompostování a udržitelný rozvoj.....         | 17 |
| 1.3 Využití termálního reaktoru .....             | 18 |
| 2 Biochemie kompostu .....                        | 19 |
| 2.1 Průběh kompostovacího procesu .....           | 19 |
| 2.2 Význam jednotlivých komponent vsádky .....    | 24 |
| 3 Termomechanika reaktoru.....                    | 25 |
| 3.1 Přenos tepla .....                            | 25 |
| 3.2 Princip odběru tepla .....                    | 29 |
| 3.3 Teplovodní soustava .....                     | 29 |
| 4 Experimentální provoz termálního reaktoru ..... | 32 |
| 4.1 Stavba termálního reaktoru .....              | 32 |
| 4.2 Průběh teplot.....                            | 35 |
| 4.3 Vyhodnocení experimentu .....                 | 44 |
| 5 Termální reaktory ve světě.....                 | 45 |
| 6 Závěr .....                                     | 46 |
| Seznam použité literatury.....                    | 47 |
| Seznam příloh .....                               | 50 |

## Úvod

S rozvojem poptávky po elektrické energii a s rostoucími obavami o budoucnost životního prostředí se do popředí veřejného zájmu dostávají obnovitelné zdroje energie. Aktuálním tématem je také otázka ukládání narůstajícího množství produkovaného odpadu.

Z tohoto důvodu se jako perspektivní možnost jeví využití energetického potenciálu biomasy, tedy organického odpadu. Dosavadní nejrozšířenější využití tohoto zdroje energie spočívá v jeho spalování, které s sebou ovšem nese negativní vlivy na životní prostředí v podobě emisí a ztráty cenných živin v biomase obsažených.

Odběr tepelné energie vznikající při kompostování organického odpadu nabízí jiný pohled na využití biomasy, přičemž její hnojivý potenciál zůstává zachován.

Tato metoda si však neklade za cíl nahradit stávající zdroje energie, ale nabídnout lehce dostupnou alternativu pro domácnosti, malé a střední farmy, vzdělávací instituce i komerční objekty.

Cílem této práce je osvětlit problematiku odběru tepla vznikajícího při rozkladných procesech v kompostu a dále otestovat praktickou aplikaci této metody a zhodnotit její reálnou účinnost. První kapitola pojednává o otázkách ekologie a udržitelného rozvoje a navrhuje možná využití termálního reaktoru v praxi. V další kapitole jsou objasněny biochemické děje a faktory ovlivňující průběh kompostovacího procesu. Třetí kapitola se věnuje termomechanické stránce odběru tepla vznikajícího při rozkladu biomasy. V praktické části je uveden popis experimentální stavby termálního reaktoru, grafické zpracování vybraných dat získaných v průběhu měření a zhodnocení dosažených výsledků. Závěrečná kapitola nabízí shrnutí doposud uskutečněných projektů týkajících se využití termálních reaktorů v České republice i ve světě.

# 1 Termální reaktor

Odebírání tepla z kompostu je jednoduchý a ekologický způsob získávání energie za minimální produkce odpadu a poměrně nízkých vstupních a provozních nákladů.

Jedná se o soběstačný systém fungující na principu využití tepla vznikajícího při rozkladných procesech v kompostu. Při běžném kompostování vzniká kvalitní hnojivo, které je možno navrátit zpět do přírody, avšak veškeré takto vyprodukované teplo je ztráceno v okolí. V termálním reaktoru je ovšem teplo odebíráno a využíváno k vytápění budov, skleníků či k ohřevu vody. Skladba organického materiálu v reaktoru je odlišná od běžných kompostů, protože cílem není přeměnit organické zbytky na humus co nejrychleji, ale naopak prodloužit proces rozkladu surovin probíhající za vysokých teplot.

Kromě označení termální reaktor je pro tento systém používán i název „biomilíř“. Hromada kompostu totiž připomíná milíř, tedy velkou hlinou utěsněnou hranici dřeva, jehož pyrolýzou vzniká dřevěné uhlí. V němčině je obdobně používán název „Biomeiler“ [1], v angličtině pak „compost heater“ [2].

## 1.1 Kompostování a globální oteplování

Organický odpad je dnes využíván nejen k produkci kvalitního hnojiva, ale řadí se také mezi biopaliva neboli paliva na bázi biomasy. Využití energetického potenciálu rostlinného odpadu jeho spalováním s sebou ovšem nese negativní vlivy na životní prostředí. Odběr tepla z kompostu představuje ekologičtější variantu získávání energie uložené v biomase.

Nejdůležitější negativní efekt spalování biomasy představují skleníkové plyny. Zemská atmosféra se skládá převážně z dusíku ( $N_2$ ) a kyslíku ( $O_2$ ), tedy z plynů, jejichž molekuly obsahují pouze dva atomy. Skleníkové plyny, tedy oxid uhličitý ( $CO_2$ ), vodní pára ( $H_2O$ ), metan ( $CH_4$ ) či oxid dusný ( $N_2O$ ), mají ve svých molekulách alespoň tři atomy. Tyto volně vázané struktury lépe absorbují odražené dlouhovlnné záření, tedy teplo, které by za jiných okolností uniklo do meziplanetárního prostoru a dále nepřispívalo ke globálnímu oteplování [3].

Při spalování biomasy shoří všechny uložený uhlík a uvolní se do atmosféry ve formě oxidu uhlíku. Dusík v biomase se buď přemění na skleníkový plyn oxid dusný, nebo na produkty nedokonalého spálení (například toxický amoniak), či na reaktivní oxidy  $NO_x$ , které se dále přeměňují a mohou způsobovat kyselé deště a okyselovat půdu [4].

Při hnití, tedy nekontrolovaném anaerobním rozkladu, vzniká vlivem nedostatku kyslíku metan a dochází k uvolňování toxických výluhů [5]. Se skládkováním také souvisí zábor půdy a riziko požárů. Biologický potenciál biomasy navíc zůstává nevyužit.

Při kompostování se jako produkt dýchání bakterií také uvolňuje oxid uhličitý. Toto uvolněné množství  $CO_2$  je nižší, protože asi jedna třetina uhlíku zůstává vázána ve výsledném produktu [6] a uhlík je tedy dočasně uskladněn v kompostu a nemůže se podílet na skleníkovém efektu. Ačkoliv tento skleníkový plyn je uvolňován i při kompostování, rostliny, z nichž je kompost složen, odebíraly oxid uhličitý z ovzduší při fotosyntéze. Uhlík, který se při kompostování uvolňuje, je tedy pouze část uhlíku, který byl z ovzduší odebrán.

Při kompostování tedy dochází k sekvestraci uhlíku obsaženého ve stabilizovaném kompostu, neboli k jeho uložení do půdy [7].

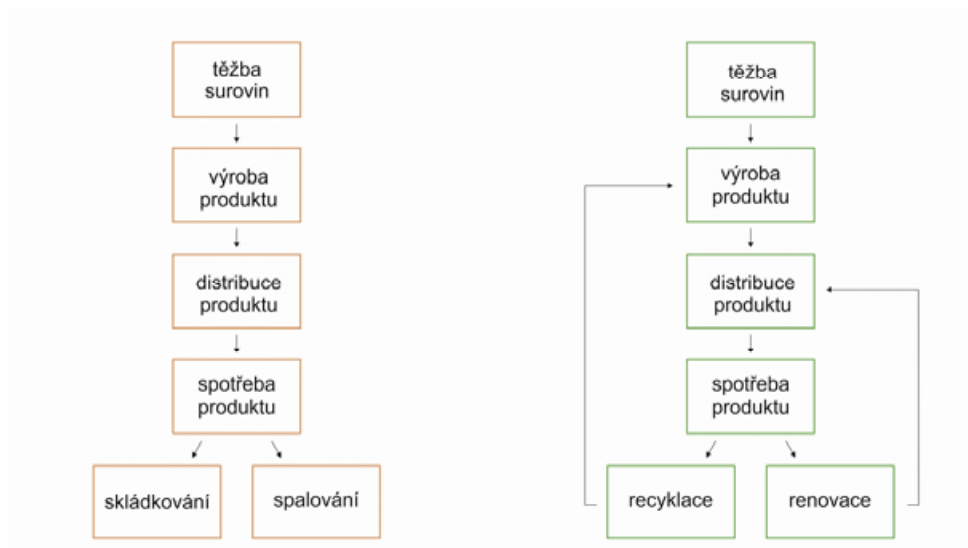
## 1.2 Kompostování a udržitelný rozvoj

Kompostování i ekologická produkce energie jsou důležitou součástí cirkulární ekonomiky. Ta se zabývá efektivitou výroby a usiluje o minimalizaci produkce odpadu vznikajícího v průmyslové výrobě. Zohledňuje těžbu surovin, dopravu, výrobu, užití produktu i následné zpracování vzniklého odpadu. Jedná se o systém nastavený tak, že materiály a energie v něm cirkulují co nejdéle a s co nejmenšími ztrátami.

Odpad je v tomto oboru vnímán jako nová surovina, tedy zdroj materiálu či energie. Tento systém napodobuje model přírodního koloběhu *půda – rostlina – živočich – trus – kompost – humus – půda*, ve kterém se jednotlivé prvky řetězce navzájem obohacují a neprodukují žádný odpad, protože každý komponent je opět zužitkován.

Klíčovým prvkem cirkulární ekonomiky je metoda Life Cycle Assessment (LCA), tedy metoda posuzování životního cyklu produktu, jež hodnotí potenciální environmentální dopad celého životního cyklu produktu, tedy i emise vázané sekundárně a terciálně způsobené například dopravou [8].

V současné době průmysl funguje na principu lineárního řetězce *surovina - výrobek - odpad*, který znatelně zatěžuje životní prostředí skládkováním. Cílem cirkulární ekonomiky je tento řetězec uzavřít do koloběhu, tedy proměnit odpad v novou surovinu a využít všechny produkty vznikající ve výrobě, viz obrázek 1.1. Látky organického původu mohou být snadno navraceny do biosféry, naproti tomu se syntetickými látkami musí být nakládáno tak, aby mohly být využívány opakovaně a nebylo nutné je do biosféry navracet [9].



Obrázek 1.1 – Srovnání konvenčního a ekologického produkčního řetězce

Technologie odběru tepla z termálního reaktoru má potenciál tato kritéria splňovat ve velkém rozsahu, protože velká část vstupních komponent je vnímána jako odpad a při jeho využití žádný další odpad nevzniká.

### 1.3 Využití termálního reaktoru

Díky poměrně jednoduché konstrukci, dostupnosti surovin a nízkým vstupním nákladům lze termální reaktor využít pro přípravu teplé vody vhodné buď pro přímé použití, či pro ohřev skleníku, částečné vytápění a temperaci rodinných domů a chat, v jejichž blízkosti lze umístit větší množství hmoty ke kompostování.

Tento systém je vhodný nejen pro domácnosti, ale také pro školy, školky a další vzdělávací instituce, neboť spojuje ekologicky šetrnou produkci energie s přírodním zpracováním organického odpadu, tvorbou kvalitního hnojiva a se zajímavým biochemickým a fyzikálním experimentem, na kterém můžeme pozorovat rozkladné procesy, organismy žijící v kompostu a rozličné tepelné děje jako přenos tepla a fázové přeměny (vypařování, kondenzaci), které mohou sloužit jako názorná metoda výuky přírodních věd.

Možné, a v Evropě již aplikované, je i komerční využití [2]. Teplo odebrané z termálního reaktoru lze takto využít pro vytápění produkčních skleníků, přímý výhřev záhonků ve skleníku či pro vytápění a ohřev užitkové vody pro komerční budovy.

Odběr tepla z termálního reaktoru je vhodným doplňkem dalších nefosilních zdrojů energie, například fotovoltaiky, tedy odběru solární energie, jejíž účinnost v zimě vlivem nižší intenzity oslunění a zastínění v důsledku padaného sněhu klesá. Jako příhodné se jeví použití k vytápění nízkoenergetických a pasivních domů.

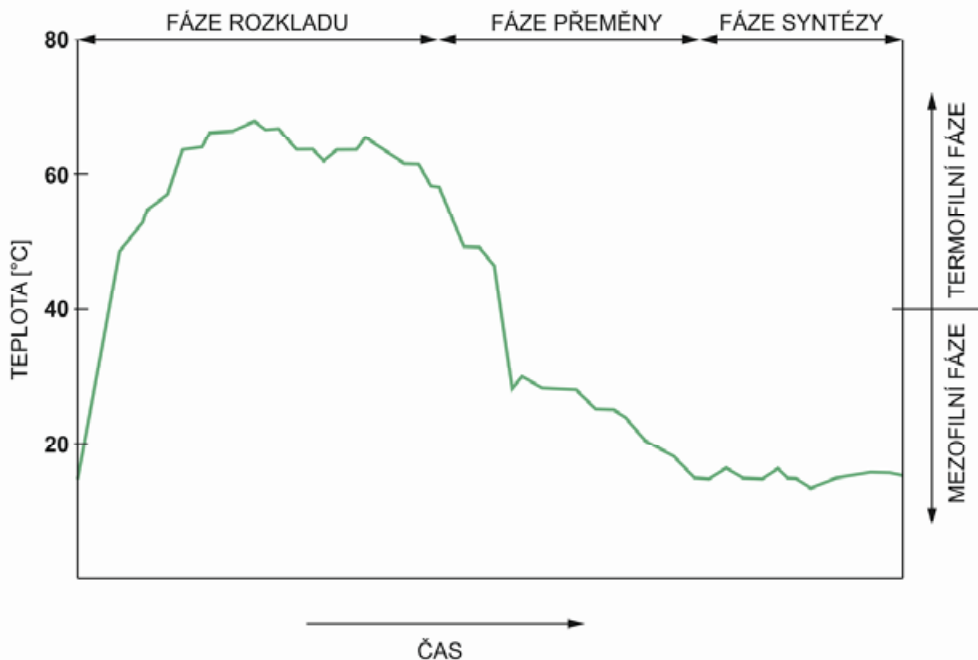
## 2 Biochemie kompostu

Kompostování lze z biologického hlediska popsat jako rozklad biologického materiálu na jednoduché sloučeniny za pomoci bezobratlých živočichů a bakterií, prvoků, hub a dalších mikroorganismů probíhající za přístupu kyslíku, tedy aerobně. V průběhu procesu se mění teploty, skladba mikroorganismů, vlhkost a kyselost prostředí, struktura a poréznost směsi a koncentrace látek (například kyslíku nutného pro aerobní rozklad) v kompostu.

### 2.1 Průběh kompostovacího procesu

Kompostovací proces lze vzhledem k časovému průběhu rozdělit na tři fáze, a to fázi rozkladu, fázi přeměny a fázi syntézy.

Současně se v závislosti na teplotách a zastoupení organismů činných v rozkladu střídá mezofilní a termofilní fáze. Mezofilní fáze je charakterizována teplotami do asi 40 °C. Nejaktivnější jsou mezofilní organismy s teplotním optimem mezi 20 °C a 45 °C [10]. Při termofilní fázi převládají termofilní organismy vyžadující teploty nad 40 °C. V počátcích rozkladu se v kompostu mohou vyskytovat i psychofilní organismy rostoucí při teplotách od -5 do 20 °C [11]. Tyto hodnoty jsou ovšem pouze orientační, protože někteří zástupci mohou přežívat i desítky stupňů Celsia mimo dané rozpětí [10].



Obrázek 2.1 – Průběh kompostovacího procesu

Počáteční teplota fáze rozkladu se blíží teplotě okolního prostředí. Mezofilní bakterie začínají rozkládat lehce dostupné látky, jako jsou cukry, škroby, tuky a bílkoviny.

Produktem jsou například dusičnany, oxid uhličitý, aminokyseliny či polysacharidy [12]. Rozklad je doprovázen vznikem tepla. Mikroorganismy se v příznivých podmínkách rychle množí a teploty v kompostu stoupají ke 40 °C.

Mezofilní mikroorganismy se mimo své teplotní optimum stávají méně konkurenceschopné a jsou nahrazeny termofilními bakteriemi, které pokračují v rozkladu a zahřívání kompostu [13]. Při teplotách kolem 55 °C umírají patogenní organismy, kompost přestává být fytotoxický, tedy toxický vůči rostlinám vlivem hnojiv a pesticidů [14] a eliminuje se klíčivost semen [15]. Tento proces se nazývá hygienizace.

Bezobratlí živočichové jako hmyz, pavouci či mlži při vyšších teplotách umírají, přecházejí do klidového stádia nebo se přesouvají do chladnějších částí kompostu, tedy k okrajům, a vracejí se, až teplota opět poklesne [15].

Stoupající teploty rozbíhají rozklad odolnějších materiálů, například dřeva. Strukturálním materiálem rostlin je lignocelulóza. Ta se skládá převážně z celulózy, hemicelulózy a odolného ligninu, který zpevňuje molekuly celulózy a způsobuje dřevnatění [16].

Lignocelulóza je rozkládána pomocí termofilních hub [14] tvořících houbová mycelia, propletená vlákna, která zachycují unikající amoniak a vracejí tak dusík zpět do kompostu [15]. Prostředí kompostu dosahuje mezní teploty až 70 °C [12]. Zásoby vysokoenergetických sloučenin se začínají ztenčovat a teplota opět klesá, čímž vznikají podmínky pro mezofilní bakterie, které pokračují s rozkladem zbylého organického materiálu [13].

Následuje fáze přeměny, v jejímž průběhu začíná teplota klesat na 40 až 45 °C. Dochází k mineralizaci, k úplné přeměně organické hmoty na anorganické látky jako je voda, oxid uhličitý a minerální formy dalších prvků. Hůře rozložitelný materiál, skelet bezobratlých a odumřelé mikroorganismy formují fyzickou strukturu humusu. Vzniklý humus má v této fázi největší hnojivý účinek.

Po dalším kompostování nastává fáze syntézy. „Živý“ humus se mění v „trvalý“ a hnojivý účinek se zeslabuje [12]. Teplota materiálu se opět vrací přibližně na teplotu okolí.

Při běžném kompostování máme za cíl přeměnit organický materiál na humus v co nejkratším čase, protože cílem tohoto procesu je pouze zpracování organických zbytků a tvorba kvalitního hnojiva. Nepřidáváme proto do kompostu tak velké množství uhlíkatých materiálů, které prodlužují první fázi kompostování, fázi rozkladu.

Při kompostování v termálním reaktoru ovšem humus získáváme až jako sekundární produkt a naším hlavním cílem je odebrat co nejvíce přebytečného tepla. Proto se snažíme termofilní fázi prodloužit na maximum, aby kompost sloužil jako dlouhodobý zdroj tepla.

Průběh kompostování je do značné míry ovlivněn podmínkami prostředí a to kolísáním teplot, srážkami, větrem nebo případným vysycháním materiálu. Skladba počáteční směsi určuje nejen intenzitu a dobu zrání, teplotu či vznik zápachu, ale zejména dobu trvání termofilní fáze rozkladu.

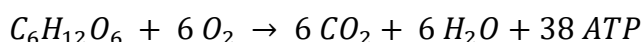


Hlavními faktory ovlivňujícími průběh kompostování jsou:

- mikrobiální aktivita
- teplota
- koncentrace kyslíku
- C/N poměr
- obsah živin
- vlhkost
- kyselost prostředí
- struktura a poréznost materiálu [17]

Pro biotu kompostu je velmi důležitým faktorem obsah kyslíku v prostředí. Bakterie v kompostu jsou chemoorganotrofní, takže získávají energii oxidací organických látek a to buď dýcháním, či kvašením [18]. Při oxidaci glukózy je v obou případech prvním krokem glykolýza neboli rozklad glukózy, při které se uvolňuje energie a tedy i teplo.

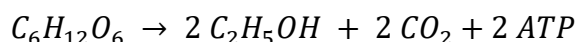
Dýchání probíhá oxidací vzdušným kyslíkem. Jeho původcem jsou aerobní bakterie. Reakce 2.1. popisuje oxidaci jedné molekuly glukózy vzdušným kyslíkem na oxid uhličitý, vodu a 38 molekul adenosintrifosfátu (ATP), látky, při jejímž rozkladu se uvolňuje značné množství energie. Pomocí množství vznikajících molekul ATP lze posoudit energetickou výtěžnost jednotlivých chemických reakcí [19].



*Reakce 2.1 – Oxidace glukózy vzdušným kyslíkem*

Je žádoucí, aby koncentrace kyslíku v kompostu dosahovala alespoň 10 % [6]. Při nižších hodnotách aerobní bakterie vymírají a nahrazují je bakterie anaerobní, pro které je kyslík toxický.

Ačkoliv kvašení začíná také rozkladem glukózy, při dalším pokračování oxidace se již neuvolňuje energie a proces se zastavuje na nedokonale oxidovaných látkách. Kvašení je tedy energeticky a tepelně mnohem méně výnosné. Například při štěpení glukózy na ethanol a oxid uhličitý vznikají pouze dvě molekuly ATP, viz reakce 2.2 [19].



*Reakce 2.2 – Anaerobní štěpení glukózy*

Další možností anaerobního rozkladu je dle skladby přítomných mikroorganismů také hnití. Při něm dochází ke vzniku skleníkového plynu metanu a amoniaku (čpavku), který způsobuje nežádoucí zápach.

V počátcích rozkladu se koncentrace kyslíku v pórech drží na hodnotách podobných obsahu kyslíku ve vzduchu, tedy 15 až 20 %. Oxid uhličitý je obsažen asi 0,5 až 5 % objemu. S pokračujícím rozkladem podíl kyslíku klesá za současného nárůstu koncentrace oxidu uhličitého produkovaného bakteriemi při procesu dýchání [20].

Provzdušňování probíhá jak vlivem větru, tak přirozenou difuzí kyslíku. Kyslík má tendenci přemísťovat se z prostředí o vyšší koncentraci (okolní vzduch), do prostředí s nižší koncentrací (kompost).

Pokud ale systém není schopen udržet potřebné množství kyslíku přirozeně, je nutné kompost provzdušňovat otáčením, promícháváním či pomocí ventilace [17].

Kvalita kompostovacího procesu je však závislá nejen na přítomnosti kyslíku, ale také dalších prvků a to hlavně uhlíku (C), který slouží jako zdroj energie a důležitá stavební látka buněk, a dusíku (N) jako stěžejní součásti bílkovin, nukleových kyselin, enzymů a dalších látek nutných pro růst a správnou funkci buněk.

Z tohoto důvodu stanovujeme optimální C/N poměr kompostu a to jeho správnou skladbou dle hodnot C/N poměru jednotlivých složek, které lze vyhledat v odborné literatuře. Ideální poměr je udáván jako 30 jednotek hmotnosti uhlíku na každou jednu jednotku hmotnosti dusíku [6].

Pokud je dusíku více, přebytky se uvolňují ve formě plynného amoniaku ( $\text{NH}_3$ ), který způsobuje nežádoucí zápach. Nedostatek dusíku znamená omezení růstu mikroorganismů, kvůli čemuž bude rozklad postupovat pomaleji a kompost se dostatečně nezahřeje [6].

Jak je zřejmé z tabulky 2.1, materiály s vyšším obsahem dusíku lze charakterizovat jako čerstvé, zelené a vlhčí, tedy posekaná tráva, zelené rostliny a ovocné a zeleninové zbytky. Dále sem patří chlévská mrva a hnůj. Více uhlíku obsahují starší, dřevnaté a suché materiály, tedy dřevní štěrka, kůra, suché listí či piliny [12].

| <b>Materiál</b>   | <b>C/N poměr</b> |
|-------------------|------------------|
| Kravský hnůj      | 20 : 1           |
| Koňský hnůj       | 25 : 1           |
| Zeleninové zbytky | 12 – 20 : 1      |
| Posečená tráva    | 12 – 25 : 1      |
| Listy             | 30 – 80 : 1      |
| Sláma             | 40 – 100 : 1     |
| Kůra              | 100 – 130 : 1    |
| Papír             | 150 – 200 : 1    |
| Piliny            | 400 : 1          |
| Dřevní štěrka     | 800 : 1          |

Tabulka 2.1 – Orientační C/N poměr vybraných materiálů [21], [22]

Poměr C/N v kompostu s postupujícím rozkladem klesá až na 10 ku 1, protože při mikrobiologických procesech jsou dvě třetiny uhlíku uvolňovány v oxidu uhličitém a pouhá třetina se s dusíkem uchovává v buňkách kompostu a využívá dále, když buňky odumírají [6].

Při stanovení C/N poměru je také nutno zohlednit povahu materiálu (jeho zrnitost, pórovitost atd.), protože některé suroviny lépe odolávají rozkladu. Například uhlík v cukrech javorového listu dokáže zužitkovat většina rozkladačů, avšak uhlík v ligninu dřeva, je schopno rozložit menší procento mikroorganismů [15], čímž se uvolňování uhlíku zpomalí. Dřevní štěrpk sice obsahuje stejné množství uhlíku jako piliny, její uhlík je však kvůli menší ploše povrchu mikroorganismům hůře dostupný a rozklad je tedy také pomalejší [20].

Pro správnou funkci buněk je potřeba i adekvátní množství fosforu, draslíku a dalších prvků. Tento požadavek však není při tvorbě kompostu limitující, protože tyto prvky jsou ve zdrojových materiálech kompostu bohatě obsaženy [6].

Důležitým faktorem pro správnou funkci mikrobiologických aktivit je i kyselost prostředí (pH). Optimální pH je asi 6,5 až 8, tedy blízké neutrální hodnotě [22]. Kyselost prostředí se v průběhu kompostovacího procesu mění, protože bakterie uvolňují organické kyseliny při trávení materiálu. V první fázi, kdy je rozklad nejintenzivnější, se uvolňuje větší množství kyselin a hodnota pH se snižuje. Tento stav je ideální pro růst hub a rozklad celulózy a ligninu [6].

Při přílišném poklesu pH, například při změně systému v anaerobní a následné větší kumulaci kyselin, se rapidně snižuje mikrobiální aktivita [6]. Vhodnou zásaditost prostředí lze navrátit provzdušňováním prostředí.

Žádoucí vlastností finálního produktu je neutrální pH, protože optimální hodnota pH pro půdní druhy od písčitých, přes hlinité půdy, až po jíly se pohybuje mezi 5 až 7.

Mikrobiální rozklad probíhá hlavně v tenkém vodním filmu na povrchu organické hmoty. Ideální vlhkost prostředí kompostu se pohybuje mezi 40 až 60 % [20]. Nižší vlhkost je nežádoucí pro biotu, protože voda je nutná pro transport živin a umožňuje pohyb mikroorganismů. Jejich činnost se při nedostatečné vlhkosti zpomalí nebo přechodem do klidového stádia zastaví [15]. Při vysokých teplotách termofilní fáze dochází ke zvýšenému vypařování vody, je proto nutné vlhkost hlídat, aby nedošlo k vyschnutí kompostu. Vyšší vlhkost způsobuje nejen vyplavení živin, ale způsobuje také zaplňování pórů, čímž se vytváří nežádoucí anaerobní podmínky [20].

Voda funguje také jako tepelný “setrvačnick” a to díky velmi vysoké měrné tepelné kapacitě. Měrná tepelná kapacita vody v pokojové teplotě a tlaku se pohybuje kolem  $4200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Toto číslo je sice závislé na okamžité teplotě dané látky, ale v rozsahu teplot v reaktoru se hodnoty liší jen v řádech jednotek Joulů [23].

Mezi další fyzikální faktory, na kterých závisí funkčnost kompostu, patří velikost částí organického materiálu, tedy zrnitost. Čím větší jsou části, tím déle trvá mikroorganismům proces rozkladu. Menší části sice poskytují mnohem větší povrch na stejné množství materiálu, avšak znesnadňují provzdušňování kompostu, protože ponechávají jen velmi malé mezery. Pro požadovanou funkčnost reaktoru, tedy co nejdelší produkci tepla, používáme raději dřevní štěrpk, nežli piliny, protože se snažíme první fázi rozkladného procesu prodloužit.

## 2.2 Význam jednotlivých komponent vsádky

Skladba kompostovaného materiálu v termálním reaktoru se liší od běžných kompostů. Klíčovými prvky v kompostovací směsi jsou dřevní štěpka, dusíkatý hnůj, vyzrálý kompost a zbytky zelených rostlin.

Dřevo jako materiál je v kompostu používáno převážně proto, že jeho rozklad trvá mnohem déle, než rozklad zelených částí rostlin a to kvůli odolné stavební látce, lignocelulóze. Ta prodlužuje termofilní fázi procesu, protože dává mikroorganismům dostatek materiálu k rozkladu. Jak už bylo zmíněno výše, důležitou roli hraje velikost částí. Dřevní štěpka, tedy kusy o velikosti 1 až 3 centimetry, zanechává vzduchové mezery a zajišťuje tak lepší provzdušňování. Plocha povrchu je přitom dostatečně velká, aby bakterie dokázaly jejím rozkladem kompost dostatečně rozehrát. C/N poměr štěpky je ovšem až 800 ku 1 [21], takže je vhodné přidáním dalších surovin zvýšit množství dusíku ve směsi.

Hnůj obsahuje velké množství mikroorganismů a zásobu energetického a živného materiálu pro bakterie. Vysoký obsah dusíku je nutný pro rychlý nástup rozkladných procesů. Vhodným typem je koňský hnůj, který má oproti kravskému či prasečímu velkou výhřevnost, jež napomáhá rychlejšímu rozehrání kompostu. Jeho C/N poměr je asi 25 ku 1 [21].

Vyzrálý kompost obsahuje velké množství důležitých mezofilních bakterií, které se v blízkosti dalšího živného materiálu rychle množí a urychlují nárůst teploty.

Zelené rostliny zásobují kompost dusíkem a pomáhají tak snižovat C/N poměr směsi a zároveň slouží k jejímu naočkování bakteriemi.

## 3 Termomechanika reaktoru

### 3.1 Přenos tepla

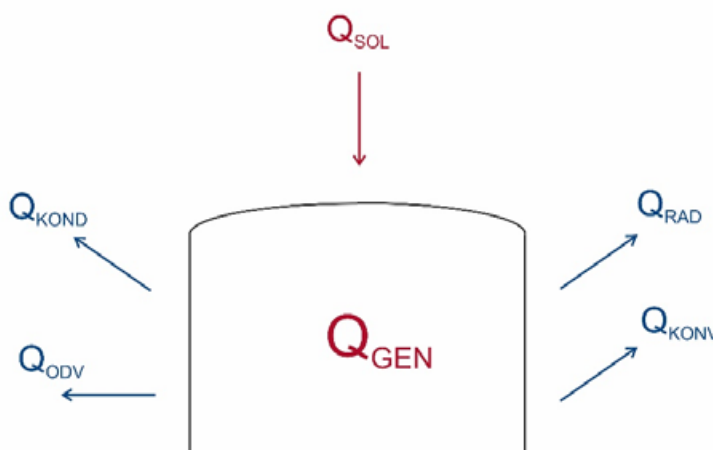
Přenos tepla, tedy děj, při kterém teplejší těleso předává část své vnitřní energie chladnějšímu tělesu, může probíhat třemi způsoby: vedením, prouděním a sáláním.

Proudění (konvekce) je přenos tepla pohybem tekutin, často vody nebo vzduchu.

Vedení (kondukce) je přenos tepla z atomu na atom jejich srážkami. Částice látky se nepřemísťují, pouze si kmitáním předávají kinetickou energii.

Sálání (radiace) je přenos tepla elektromagnetickými vlnami. Čím vyšší je teplota tělesa, tím více energie je takto vyzářeno do okolí.

Tepelná rovnováha kompostu je vyjádřena součtem tepla dodaného (teplo generované, solární zisky) a tepla odebraného (teplo odvedené a teplo ztracené konvekcí, kondukcí a radiací), viz obrázek 3.1.



Obrázek 3.1 – Tepelná rovnováha kompostu [24]

Teplo generované ( $Q_{\text{GEN}}$ ) vzniká při rozkladných procesech biomasy a jeho množství je ovlivněno povahou a množstvím kompostovaného materiálu, stupněm rozkladu či podmínkami prostředí kompostu. Pomocí kalorimetrických metod bylo ověřeno, že celková energie dostupná z kompostování je rovna energii dostupné ze spálení stejného množství materiálu. Kompletní oxidace a uvolnění veškeré energie při kompostování však kvůli omezené rozložitelnosti materiálu není možná [25].

Solární zisky ( $Q_{\text{SOL}}$ ) představují teplo přidané slunečním svitem. Jeho množství závisí na intenzitě slunečního svitu, zastínění či na úhlu paprsků.

Teplo odvedené konvekcí ( $Q_{\text{KONV}}$ ) uniká se zahřátým vzduchem. Ten má nižší hustotu než chladný, stoupá kompostem a odchází jeho vrchní částí, čímž se snaží vyrovnat tlakovou diferenci na obou koncích kompostu. Část unikajícího tepla je teplo latentní, tedy energie, která se spotřebuje při změně skupenství vody z kapalného na plynné.

Konvekce probíhá také v blízkosti povrchu kompostu, kde se okolní vzduch ohřívá a stoupá vzhůru podél jeho stěn. Množství takto unikajícího tepla je závislé i na síle větru, který napomáhá proudění vzduchu uvnitř i vně kompostu.

Ke ztrátám tepla kondukcí ( $Q_{KOND}$ ) dochází nejvíce na okrajích kompostu, kde dochází ke srážkám molekul ohřátého a okolního vzduchu. Teplo takto šířené ven závisí na velikosti povrchu kompostu či na okolní teplotě.

Teplo odvedené radiací ( $Q_{RAD}$ ) závisí na velikosti povrchu kompostu. Čím menší je kompost a čím větší je tedy poměr povrchu vůči objemu, tím větší tepelné ztráty očekáváme. Zvětšení kompostu sice snižuje poměrné tepelné ztráty, ovšem může zhoršovat vnitřní cirkulaci vzduchu. Množství tepla odvedeného radiací závisí zejména na povrchové teplotě kompostu, což vyjadřuje Stefan – Boltzmannův zákon, který říká, že intenzita vyzařování každého tělesa o nenulové absolutní teplotě je úměrná čtvrté mocnině této teploty. Rovnice 3.1 popisuje matematickou formulaci Stefan – Boltzmannova vztahu pro nedokonalé zářiče.

$$E = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4$$

*Rovnice 3.1 – Hustota zářivého toku nedokonalého zářiče*

$E$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ] ... hustota zářivého toku

$\varepsilon$  [–] ... poměrná zářivost povrchu tělesa

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ] ... Stefan – Boltzmannova konstanta

$T$  [K] ... absolutní teplota tělesa

Množství tepla, které lze odebrat pro použití ( $Q_{ODV}$ ), závisí na množství získávaného a ztráceného tepla. Pro správnou funkci reaktoru je nutno udržet v kompostu dostatečnou teplotu, aby nedošlo k vychladnutí a utlumení jeho mikrobiální aktivity.

Rovnice 3.2 popisuje tepelnou bilanci kompostu. Na levé straně rovnice vystupuje teplo nutné k zachování mikrobiální aktivity.

$$Q = Q_{GEN} + Q_{SOL} - Q_{KOND} - Q_{KONV} - Q_{RAD} - Q_{ODV}$$

*Rovnice 3.2 – Tepelná bilance kompostu [24]*

Nežádoucí tepelné ztráty lze regulovat pomocí tepelné izolace, avšak je velmi důležité zachovat dostatečný přísun kyslíku, aby se aerobní přeměna organického materiálu nezměnila v anaerobní. V průmyslových kompostárnách je tepelných ztrát naopak využíváno. V případě, že teplota kompostu dosáhne příliš vysokých hodnot a vytvoří tak nepříznivé podmínky pro mezofilní mikroorganismy, dochází nucenou kondukcí a konvekcí (například pomocí dmychadel či ventilátorů nebo překopáním hromady) k jejímu opětovnému snížení.

S teplem unikajícím konvekcí odchází i vodní pára, v níž je ukryto skupenské teplo vypařování. Celkovou takto uvolněnou energii lze popsat pomocí entalpie, jež v sobě zahrnuje jak teplo citelné spojené se zvýšením teploty, tak teplo latentní projevující se změnou skupenství.

Změna entalpie je vyjádřena v jednotkách kilojoule na kilogram a popisuje množství odvedeného tepla vzduchem.

$$\Delta i = \frac{Q}{m}$$

*Rovnice 3.3 – Změna entalpie*

$\Delta i$  [kJ·kg<sup>-1</sup>] ... změna entalpie

$Q$  [J] ... teplo

$m$  [kg] ... hmotnost vzduchu

Rozdíl mezi entalpií do kompostu vstupujícího a z něj vystupujícího vzduchu tvoří celkové množství tepelné energie odebrané vzduchem.

Pro ilustraci lze uvést příklad vzduchu o teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 80 % vstupujícího do kompostu [25]. Entalpie tohoto vzduchu je rovna asi 51 kJ·kg<sup>-1</sup> suchého vzduchu, viz příloha A. Ven vystupuje vzduch ohřátý na teplotu 50 °C a zvlhčený na 99 % relativní vlhkosti. Jeho entalpie je asi 278 kJ·kg<sup>-1</sup> suchého vzduchu [26].

Z rovnice entalpie nenasyčeného vlhkého vzduchu, lze zjistit podíl citelného a latentního tepla v unikajícím vzduchu.

$$i = i_v + x \cdot i_p$$

*Rovnice 3.4 – Entalpie nenasyčeného vlhkého vzduchu*

Kde  $i$  je entalpie vlhkého vzduchu,  $i_v$  entalpie suchého vzduchu,  $i_p$  entalpie vodní páry a  $x$  měrná vlhkost vzduchu. Hodnota  $i_v$  určuje podíl citelného tepla a součin  $x \cdot i_p$  určuje podíl latentního tepla. Entalpii suchého a vlhkého vzduchu popisují následující rovnice:

$$i_v = c_{pv} \cdot t$$

*Rovnice 3.5 – Entalpie suchého vzduchu*

$$i_p = c_{pp} \cdot t + l_{23}$$

*Rovnice 3.6 – Entalpie vodní páry*

Hodnota  $c_{pv}$  představuje měrnou tepelnou kapacitu suchého vzduchu, proměnná  $t$  teplotu vlhkého vzduchu,  $c_{pp}$  měrnou tepelnou kapacitu vodní páry a  $l_{23}$  měrné výparné teplo vody. Jejich hodnoty pro tlak 100 kPa jsou následující:

$$c_{pv} = 1,01 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{pp} = 1,84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$l_{23} = 2500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Převod relativní vlhkosti na měrnou [26].

$$x_1 = 0,012$$

$$x_2 = 0,087$$

Rozdíl množství latentního tepla ve vzduchu vstupujícím a vzduchu vystupujícím udává množství energie uniklé s vodní parou.

$$\Delta(x \cdot i_p) = x_2 \cdot i_{p2} - x_1 \cdot i_{p1}$$

*Rovnice 3.7 – Rozdíl množství latentního tepla*

$$\Delta(x \cdot i_p) = c_{pp} \cdot (x_2 \cdot t_2 - x_1 \cdot t_1) + l_{23} \cdot \Delta x$$

$$\Delta(x \cdot i_p) = 195 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Rozdíl entalpií vzduchu do kompostu vstupujícího a z něj vystupujícího popisuje rovnice 3.8.

$$\Delta i = i_2 - i_1 = 227 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

*Rovnice 3.8 – Změna entalpie*

Podíl uniklého latentního tepla vůči celkovému úbytku entalpie určuje rovnice 3.9.

$$\frac{\Delta(x \cdot i_p)}{\Delta i} = 0,86 = 86 \%$$

*Rovnice 3.9 – Podíl změny množství latentního tepla ku změně entalpie*

Výsledek dokazuje, že podstatná část tepla opouštějícího kompost konvekcí je spojena s vypařováním vody.

Tento jev lze využít pro samotný odběr tepla a to pomocí kondenzačního tepelného výměníku, na jehož povrchu se stoupající pára vysráží, latentní teplo je odebráno a zkondenzovaná voda odkapává zpět do kompostu.

Další možností je odsávání páry kanály vedenými pod kompostem nebo její přímé využití ve sklenících. Rostliny k fotosyntéze a růstu potřebují oxid uhličitý, který je v uzavřeném prostoru po jeho spotřebování nutno doplňovat, avšak kvůli udržování tepla není ve skleníku větrání žádoucí. Při procesu kompostování se ovšem oxid uhličitý uvolňuje a kompost tak okolní prostředí zásobuje nejen teplem, ale i tímto potřebným plynem. Tímto způsobem je také využito veškeré vznikající teplo, protože tepelné ztráty jsou ve skleníku přímo využity.



## 3.2 Princip odběru tepla

Princip funkce termálního reaktoru spočívá v odběru tepla generovaného při rozkladu organického materiálu. Rozehřátým kompostem je dle metody Jeana Paina [27] veden tepelný výměník, kterým je cirkulováno teplotonosné médium (nejčastěji voda). Voda se při průtoku výměníkem ohřeje přibližně na vnitřní teplotu kompostu a je dále trubkami odváděna do topného tělesa. Zde opět vychladne a je odváděna k ohřevu zpět do výměníku, čímž se celý okruh uzavírá.

Voda je trubkami cirkulována pomocí čerpadla, přičemž rychlost proudění musí být nastavena tak, aby přiváděná voda příliš neochlazovala kompost a nezpůsobila tak přílišný útlum mikrobiální aktivity. Na druhou stranu reaktor má být dimenzován tak, aby zbytečně neprodukoval větší množství tepla, než jaký odběr je čerpadlo schopno zajistit, popřípadě než můžeme využít. Důvodem je dosažení dostatečné účinnosti a zabránění zbytečným tepelným ztrátám neúměrným k tepelnému výkonu a tedy zajištění dostatečné finanční návratnosti.

## 3.3 Teplovodní soustava

Teplovodní soustava v sobě zahrnuje zdroj, rozvod i spotřebič tepla a je složena z následujících prvků:

- tepelný výměník
- čerpadlo
- akumulční nádoba
- spotřebič tepla
- měřicí zařízení
- filtr
- expanzní nádoba
- odvzdušňovací ventil

Voda se nejdříve ohřívá v tepelném výměníku uvnitř kompostu. Jeho objem musí být zvolen tak, aby se kapalina při průtoku dostatečně ohřála. Použitý materiál ovlivňuje rychlost prostupu tepla. Dle metody Jeana Paina je vhodné použít trubku stočenou do spirálovitého či šroubovitého tvaru.

Druhou variantou je použití zásobníku, v němž se naráz ohřívá větší množství vody, která je následně odpouštěna a využívána. Zásobník je poté opět doplněn vodou určenou k ohřátí. Výhodou takového systému je, že pro jeho funkci není nutný neustálý provoz čerpadla, které by zajišťovalo konstantní průtok, ovšem použití tohoto druhu ohřevu je velmi omezené. Voda může být použita například v zahradní sprše či při umývání nádobí.

K cirkulaci vody je vhodné použít oběhové čerpadlo. Tento typ čerpadel je běžně používán v teplovodních okruzích. Jakmile je voda uvedena do pohybu uzavřeným okruhem, potřebuje již sílu pouze k překonání třecího odporu. Kapalina v pohybu dodává kinetickou energii kapalině před sebou. Z tohoto důvodu mají oběhová čerpadla poměrně nízkou spotřebu energie.

Dle informací uvedených v knize Gaelana Browna [2] se doporučuje, aby voda cirkulovala raději nižší rychlostí, avšak nepřetržitě, protože náhlé teplotní změny v prostředí kompostu mohou být nežádoucí pro důležité mikroorganismy. To ovšem ztěžuje praktické použití této vytápěcí metody.

Z tohoto důvodu je pro efektivnější odběr tepla možno použít akumulární nádobu, která ohřátou vodu akumuluje a dává dle potřeb uživatele. Tento systém pak funguje ve dvou propojených obvodech. V prvním voda cirkuluje mezi tepelným výměníkem a nádobou a ve druhém mezi nádobou a topným tělesem, stejně jako je tomu u klasického systému teplovodního topení. Soustava může také pracovat na principu automatického spínání čerpadla při překročení určité teploty v kompostu. Tímto způsobem je zajištěno, že tepelný výměník neodebere větší než přebytečné množství tepla.

Systém může fungovat i samotížně, a to na principu přirozené konvekce. Ohřátá voda má nižší hustotu než studená a proudí trubkami do vyšších míst instalace. Tam se nachází topné těleso. Jakmile se voda ochladí, klesá zpět do tepelného výměníku. Pro správnou funkčnost je nutné použít trubky dostatečné tloušťky, aby snáze docházelo k promíchávání vody.

Voda je přiváděna do spotřebiče tepla (například radiátorové nebo podlahové topení, akumulární nádoba), jemuž předává teplo a vrací se zpět do tepelného výměníku.

Aktuální stav teplotního média lze kontrolovat pomocí měřících zařízení, tedy teploměru, tlakoměru či průtokoměru. Mechanické nečistoty v teplotním médiu, například koroze kovových prvků, jsou zachytávány pomocí filtru.

K vyrovnávání změn tlaku a objemu kapaliny v důsledku jejího tepelného kolísání slouží tlaková expanzní nádoba. Ta udržuje přetlak v soustavě v potřebném rozmezí. V ocelové nádobě je nepropustná elastická membrána oddělující vyrovnávací plyn od cirkulované kapaliny, v tomto případě vody. Pokud je voda studená, velká část nádoby je vyplněna plynem. Při růstu teploty se zvětšuje tlak kapaliny, ta se rozpíná a vstupuje do expanzní nádoby, čímž stlačuje plyn na druhé straně membrány. Pokud teplota a tedy tlak v kapalině klesá, kapalina je plynem vytlačována zpět do soustavy.

K hadicím je vhodné připojit i odvzdušňovací ventil, který plní podobnou funkci jako odvzdušňovací ventil teplovodního topení. Plyny ve výměníku kvůli horším tepelným vlastnostem (měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost) omezují odběr tepla z kompostu [28].

Plyny se do trubek mohou dostat několika způsoby. Při napouštění teplovodního systému je vzduch v trubkách postupně stlačován a kvůli nižší hustotě se hromadí v nejvyšších místech systému. Zde vzduch způsobuje tlak na vodní hladinu, a pokud nemá kam uniknout, rozpouští se ve vodě. Plyny jsou také obsaženy v samotné vodě napouštěné z vodovodu a to až v množství 22 mililitrů na litr (asi 14 ml dusíku a 8 ml kyslíku na litr) [29]. Do trubek se také mikrotrhlinami či nedostatečně izolovanými spoji může dostávat vzduch z okolí. Kromě zhoršení tepelných vlastností dochází působením vzdušného kyslíku k tvorbě rzi na kovových součástech.

Veškeré potrubí je nutno dobře zaizolovat, aby nevznikaly nežádoucí tepelné mosty, tedy místa, kde dochází k intenzivnějšímu tepelnému toku mezi hadicí a okolím a dochází tak ke ztrátám vyprodukovaného tepla. Tepelné mosty vznikají v mezerách a nespojitostech v izolačním materiálu či na materiálech s vyšší tepelnou vodivostí, než mají okolní materiály, tedy například v kovových spojkách a rozdělovačích.

## 4 Experimentální provoz termálního reaktoru

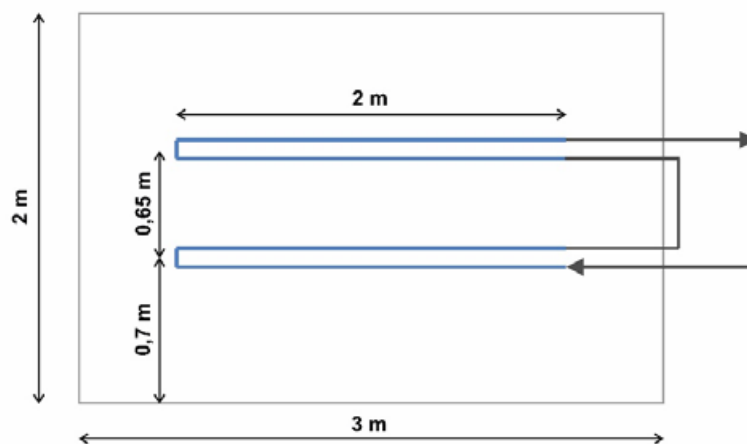
Za účelem zkušebního provozu a měření byl dne 5. 11. 2016 pod vedením Ing. Jaroslava Bajka zahájen pilotní projekt stavby termálního reaktoru v Milovicích u Mikulova, viz příloha B. Cílem experimentu bylo otestovat způsob ohřívání vody pomocí biomasy dle metody Jeana Paina [27], čili použitím tepelného výměníku umístěného uvnitř kompostu. Záměrem bylo také podrobně zmonitorovat průběh teplot v kompostu, využít vzniklé teplo na vytápění pokusné místnosti, určit přibližný výkon reaktoru a získané poznatky použít pro další studium tohoto tématu. Očekávaný výkon termálního reaktoru byl asi 1 kW.

### 4.1 Stavba termálního reaktoru

Reaktor byl sestaven z jednoduché pletivové konstrukce plněné materiálem určeným ke kompostování. Uvnitř byly uloženy dva tepelné výměníky trubkami propojené s radiátorovým topením umístěným v pokusné místnosti. Jako teponosné médium byla použita voda.

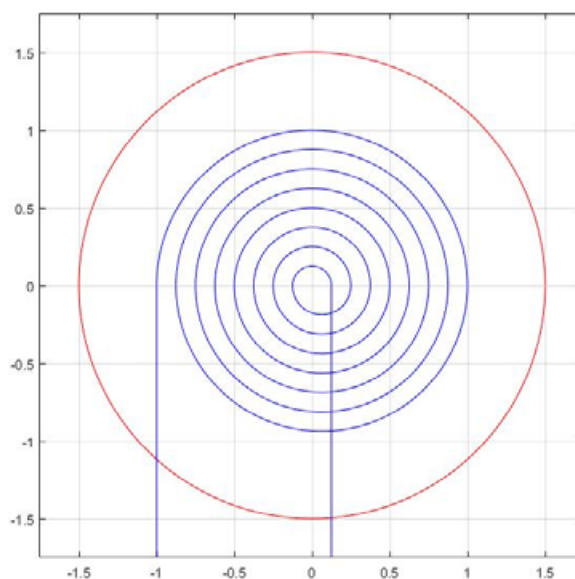
Ke kompostování bylo použito asi 10 m<sup>3</sup> dřevní štěpky z náletových dřevin z mezí mezi vinohrady sloužící jako hlavní materiál k rozkladu, dále 2 m<sup>3</sup> slamnatého koňského hnoje pro vysoký obsah dusíku, jako zásoba živného materiálu pro bakterie a bohatý zdroj mikroorganismů. Z ingrediencí bohatých na dusík byly použity i čerstvé kopřivy a zbytky zahradních rostlin po sezóně. Naopak z materiálů s vyšším C/N poměrem bylo přidáno suché opadané listí. Pro rychlejší nástup rozkladných procesů bylo použito i menší množství vyzrálého kompostu a zeminy sloužící k naočkování kompostu důležitými rozkladnými bakteriemi. Celkové množství tohoto materiálu se pohybovalo kolem 2 m<sup>3</sup>.

Do pletivové konstrukce kruhového tvaru o průměru 3 metry byla postupně vrstvena směs materiálu, která byla průběžně kropena 3 kubickými metry dešťové vody. Ve výšce 70 a 135 centimetrů nad zemí byly umístěny dva tepelné výměníky vyrobené z polyethylenové (PE) trubky navinuté do spirály a připevněné k železné kari síti, viz obrázek 4.1.



Obrázek 4.1 – Umístění tepelných výměníků v kompostu

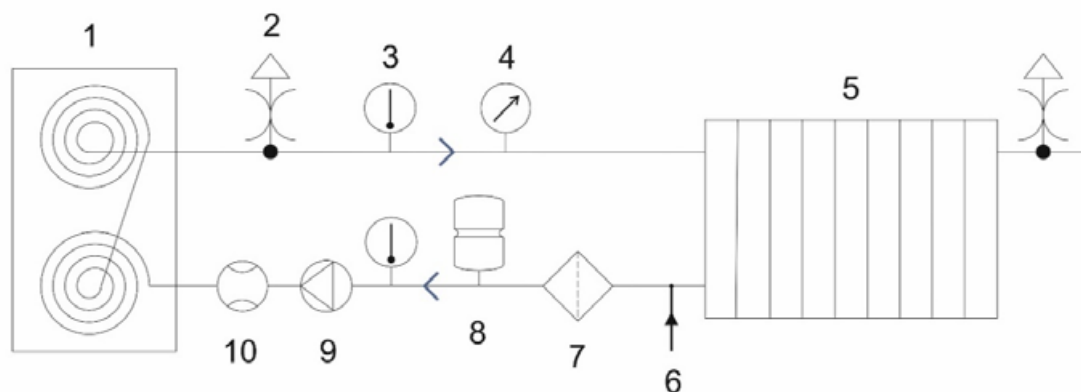
Délka trubky použité pro každý výměník byla 26,5 metru. Na výměník i rozvody byla použita polyethylenová trubka  $25 \times 3,5 \text{ mm}$  s vnitřním průměrem 18 mm (PE100 LDPE).



Obrázek 4.2 – Schéma tepelného výměníku

Na výměníky byly napojeny trubky vedoucí do radiátorového topení. Délka vedení byla 12 metrů, z čehož 4 metry byly vedeny venkovním prostředím a izolovány Mirelonem, pěnovým polyethylenem, o tloušťce 4 cm. Zbytek byl veden vytápěnou místností.

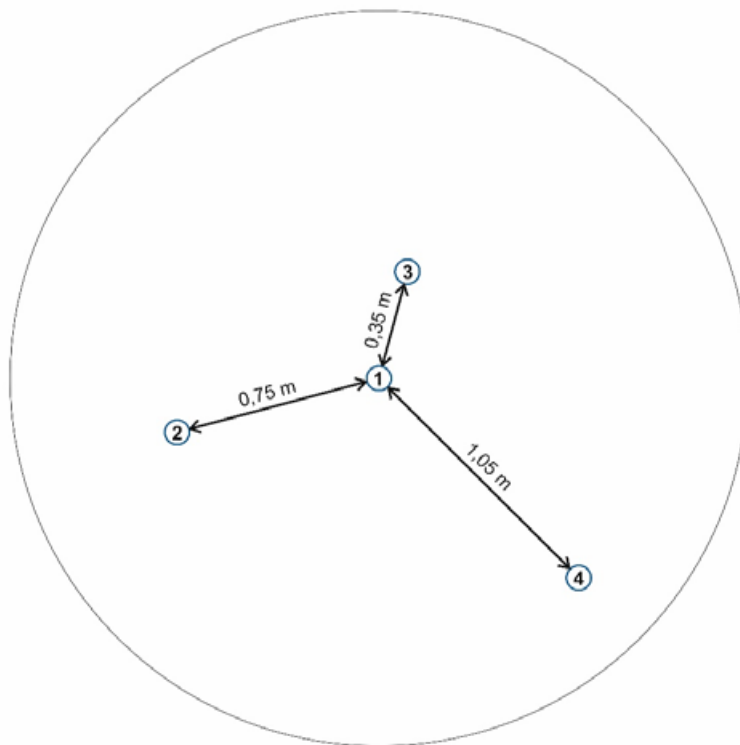
Použito bylo průtokové čerpadlo, které při příkonu 60 Wattů udržovalo průtok na  $4,6 \pm 0,1$  litrů za minutu, které bylo spouštěno pouze při testování výkonu. Čerpadlo nasávalo ochlazenou vodu, která kvůli vyšší hustotě klesala ke dnu radiátoru. Součástí okruhu byla i expanzní nádoba, průtokoměr, tlakoměr, teploměr, filtr a odvzdušňovací ventily (obrázek 4.3, příloha C).



Obrázek 4.3 – Schéma teplovodního okruhu

- |                         |                        |                     |
|-------------------------|------------------------|---------------------|
| 1. tepelný výměník      | 5. radiátorové topení  | 9. oběhové čerpadlo |
| 2. odvzdušňovací ventil | 6. přívod tlakové vody | 10. průtokoměr      |
| 3. teploměr             | 7. filtr               |                     |
| 4. tlakoměr             | 8. expanzní nádoba     |                     |

Jelikož v kompostu předpokládáme rovnoměrné rozložení surovin, tedy zdroje tepla, předpokládáme teplotní symetrii v radiálním směru. Z tohoto důvodu měření probíhalo ve dvou vrstvách čidel různě vzdálených od středu kompostu. První vrstva čidel pojmenovaná BOTTOM byla umístěna ve výšce prvního výměníku, tedy 70 centimetrů nad zemí, a druhá, nazvaná TOP, 135 centimetrů nad zemí. Na obrázku 4.4 je uvedeno přesné umístění a číselné označení čidel. V místě měřeném čidly 1 předpokládáme jádro kompostu. Čidla číslo 4 byla umístěna nejbližší vnějšímu okraji kompostu, jsou proto více ovlivňována okolní teplotou (viz příloha D).



Obrázek 4.4 – Rozmístění teplotních čidel v kompostu

Průběžně byla měřena i teplota v blízkosti kompostu (čidlo s označením NEAR). Čidlo bylo umístěno 30 cm od horního okraje kompostu a bylo kryto před deštěm i slunečním zářením. Naměřené teploty byly tedy ovlivňovány střídavým ohřevem tepla vycházejícího z kompostu a ochlazováním venkovním vzduchem, což se v grafech projevuje teplotním kolísáním.

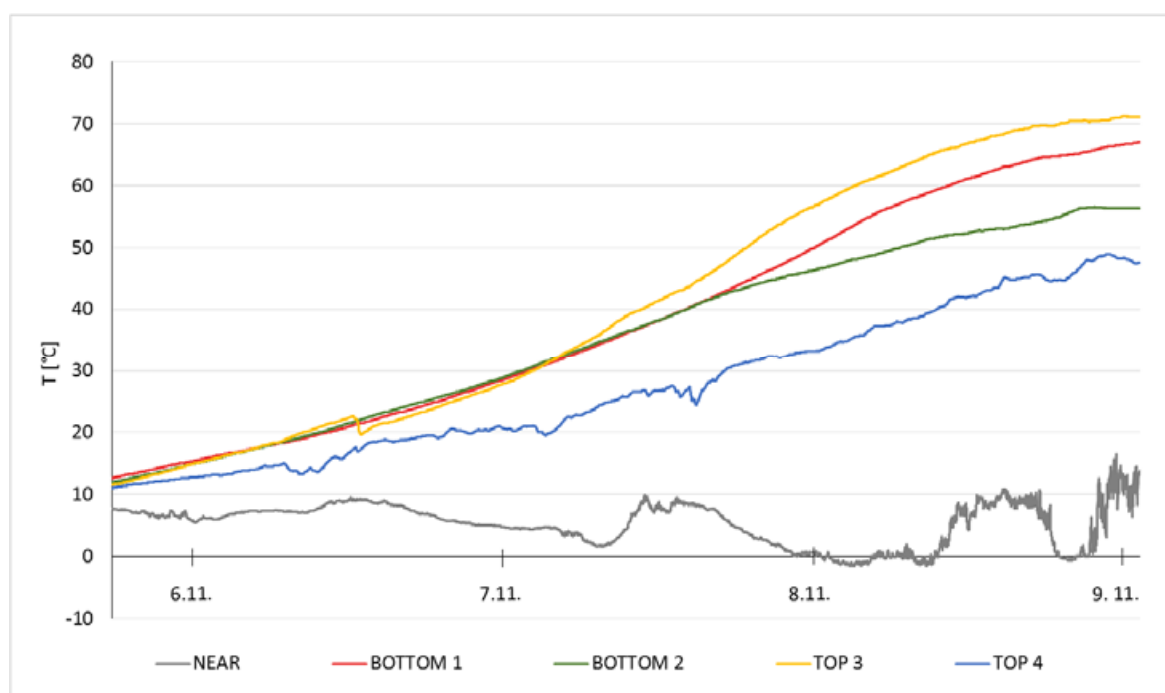
Použita byla čidla Dallas DS18S20, jejichž přesnost je výrobcem určena na  $\pm 0,5$  °C v rozsahu teplot od  $-10$  °C do  $+85$  °C, takže menší teplotní výkyvy jsou pod rozlišovací schopností čidel. Teploty byly zaznamenávány v pětisekundových intervalech. Pro tvorbu grafů v této práci byla použita minutová data vytvořená průměrováním dvanácti hodnot naměřených v každé minutě.

## 4.2 Průběh teplot

Měření dlouhodobého charakteru bylo započato v sobotu 5. 11. 2016. Sesbírány byly miliony hodnot, avšak pro popis důležitých momentů kompostovacího procesu bylo zvoleno několik milníků.

Počáteční teploty v celém kompostu se pohybovaly mezi 11 až 13 °C, na čidle umístěném v blízkosti kompostu bylo naměřeno asi 8 °C. Tento teplotní rozdíl byl pravděpodobně způsoben přítomností čerstvého koňského hnoje ve směsi.

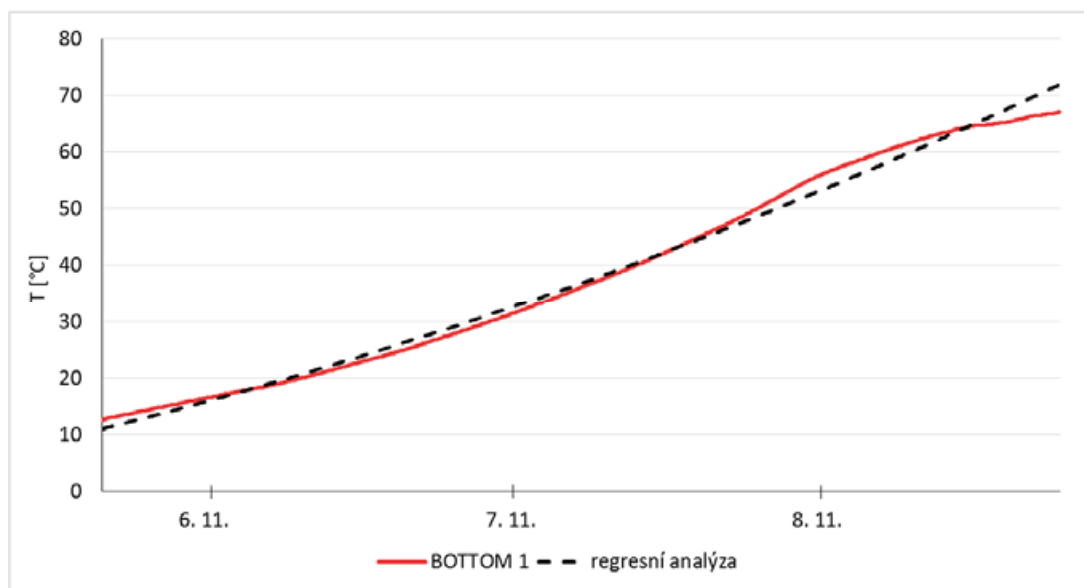
Teplota v kompostu stoupala až do středy 9. 11., kdy se na čidle TOP 3 ustálila asi na 71 °C. Kompost se tedy dostal do termofilní fáze rozkladu a dosáhl teplotního maxima.



Graf 4.1 – Rozehřátí kompostu

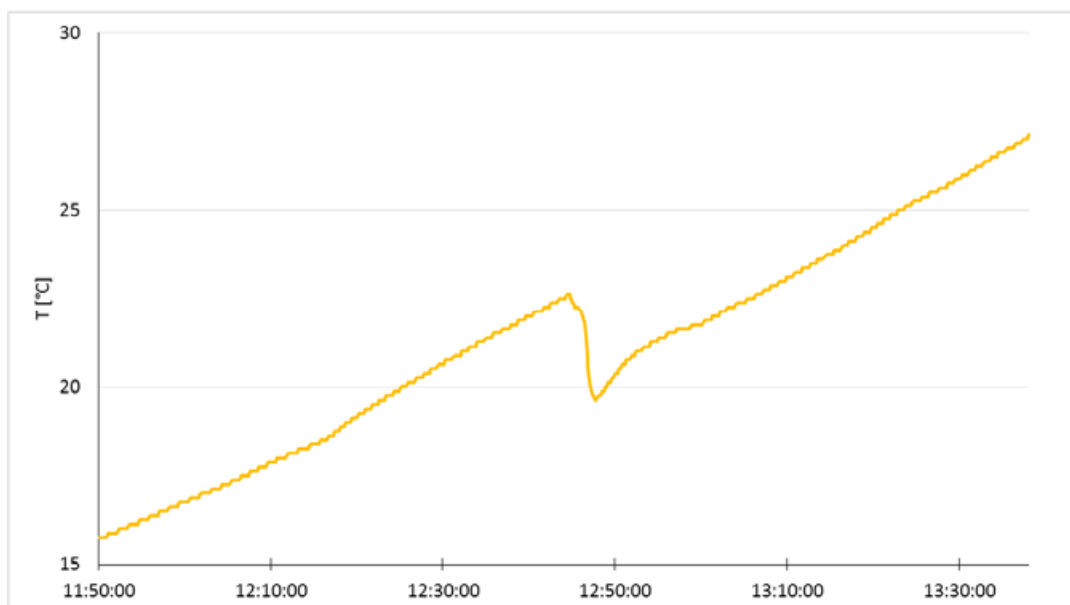
Vývoj teplot na čidle BOTTOM 1 lze dle regresní analýzy nejpřesněji modelovat polynomem druhého stupně ve tvaru  $y = ax^2 + bx + c$ , kde regresní koeficienty jsou  $a = 8 \cdot 10^{-7}$ ,  $b = 0,0088$  a  $c = 11,02$ , viz graf 4.2. Index determinace  $R^2$  udává, jaký podíl rozptylu závislé proměnné je modelem vysvětlen.

$$R^2 = 0,9926 \rightarrow 99,26 \%$$



Graf 4.2 – Regresní analýza čidla BOTTOM 1

Den po konstrukci termálního reaktoru, tedy 6. 11., bylo do kompostu přidáno 1000 litrů studniční vody o teplotě 10 °C. Voda byla přilívána v blízkosti čidla TOP 3, což způsobilo krátký teplotní výkyv zobrazený v grafu 4.3. Je zřejmé, že toto ochlazení neomezilo mikrobiální aktivitu.

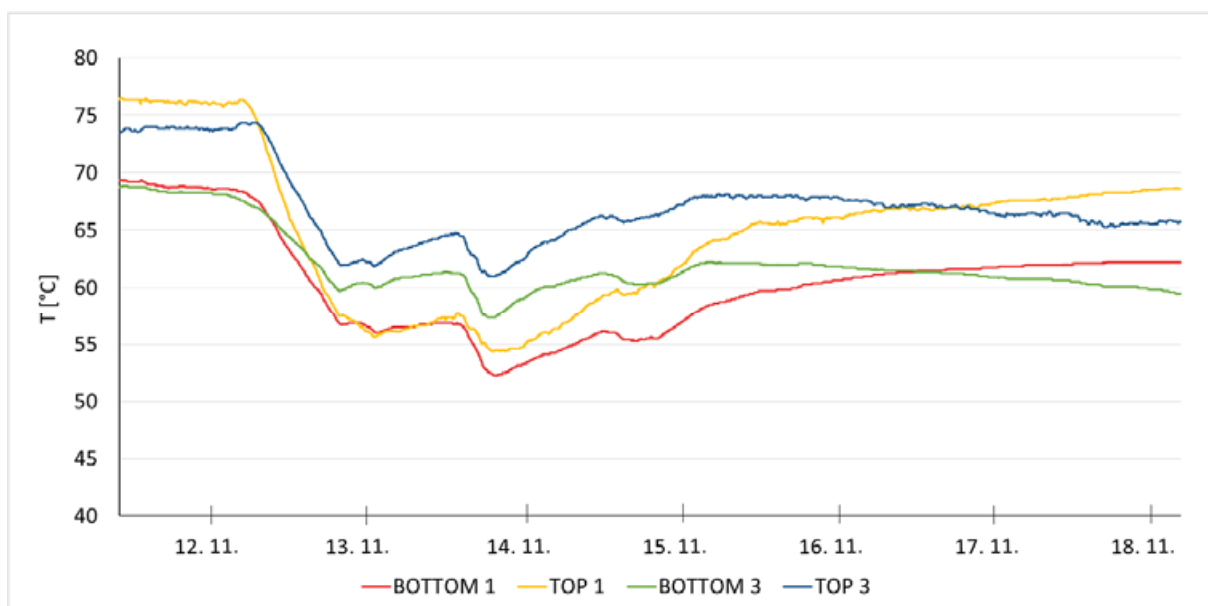


Graf 4.3 – Přidání vody na čidlo TOP 3

Poté, co teplota dosáhla maxima v termofilní fázi (až 76,5 °C na čidle TOP 1), začaly mikroorganismy vlivem příliš vysokých teplot vymírat (viz kapitola 2), mikrobiální aktivita se redukovala a kompost mírně vychladl (pod 54,4 °C na čidle TOP 1).

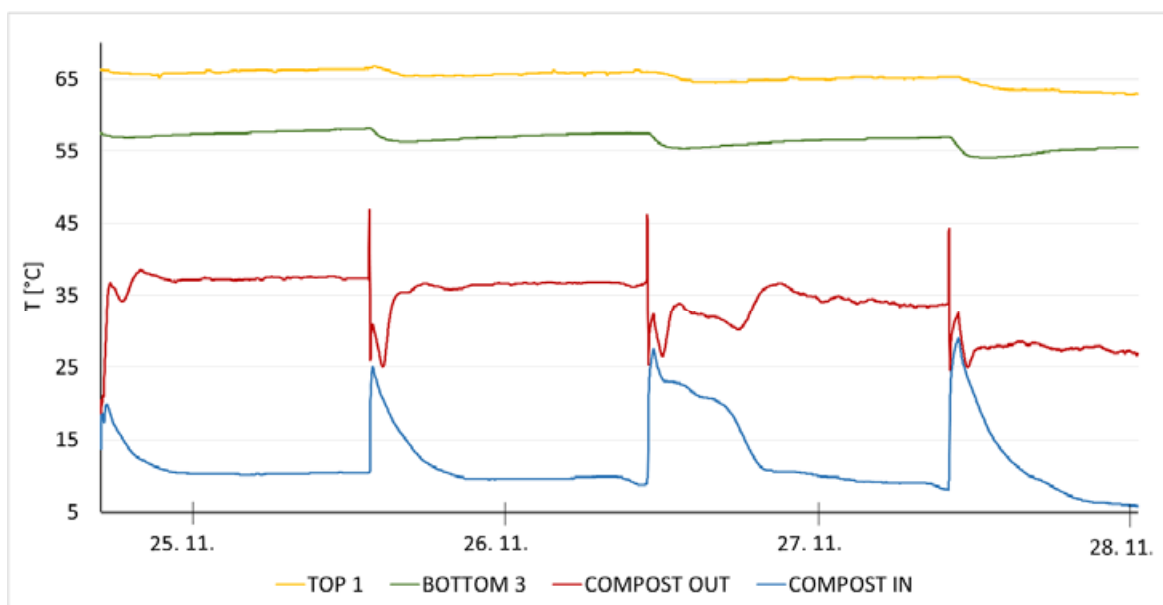


Mikroorganismy se v příznivějších podmínkách začaly opět množit a k 18. 11. znovu zahřály kompost na čidle TOP 1 na teploty kolem 68 °C. Na těchto teplotách se kompost ustálil.



Graf 4.4 – Teplotní zakolísání a stabilizace

Ve dnech 25., 26. a 27. 11. byla provedena první měření výkonu reaktoru. Test spočíval ve spuštění čerpadla a měření teplot vody přiváděné (COMPOST IN) a odváděné (COMPOST OUT) z kompostu. Je zřejmé, že každý test výkonu mírně snížil teplotu kompostu. Ta ovšem činností mikroorganismů během několika hodin opět stoupla a kompost se takzvaně zregeneroval.

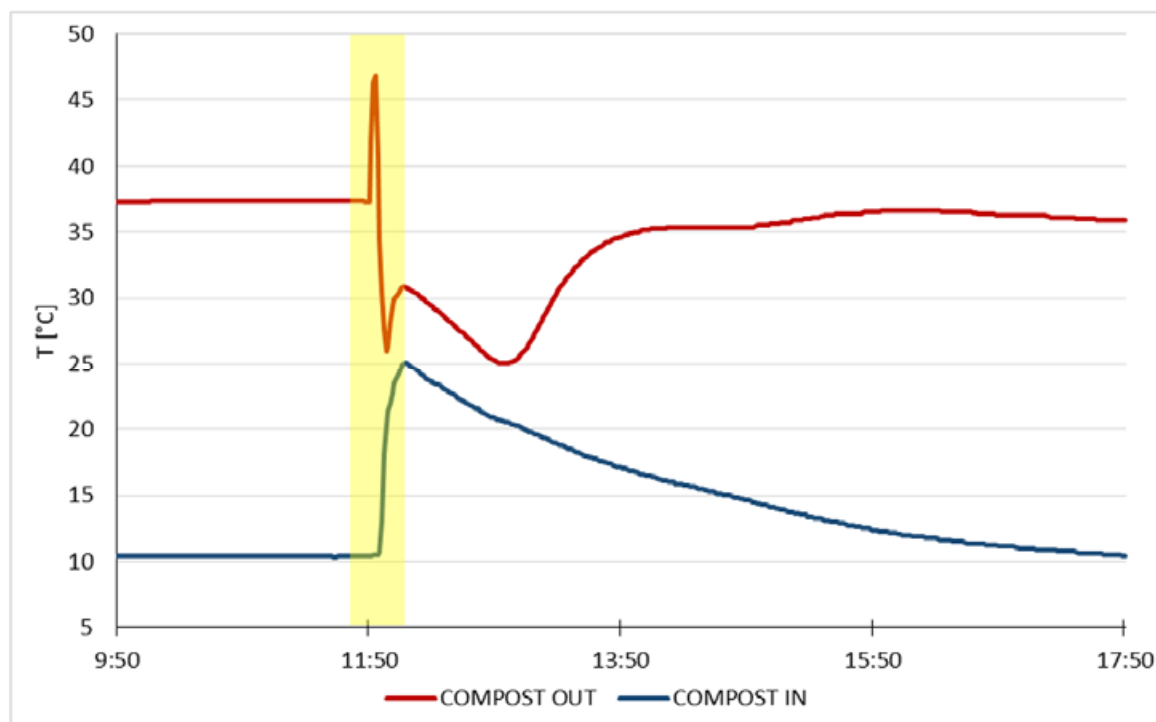


Graf 4.5 – První měření výkonu

V prvním cyklu byla voda okruhem cirkulována 15 minut. Z grafu 4.6 je zřejmé, že před spuštěním čerpadla si voda stojící ve vstupních trubkách držela teplotu 37 °C a ve výstupních 10 °C. Rozdíl teplot je způsobem stoupáním teplejší vody o nižší hustotě do vyšších míst instalace.

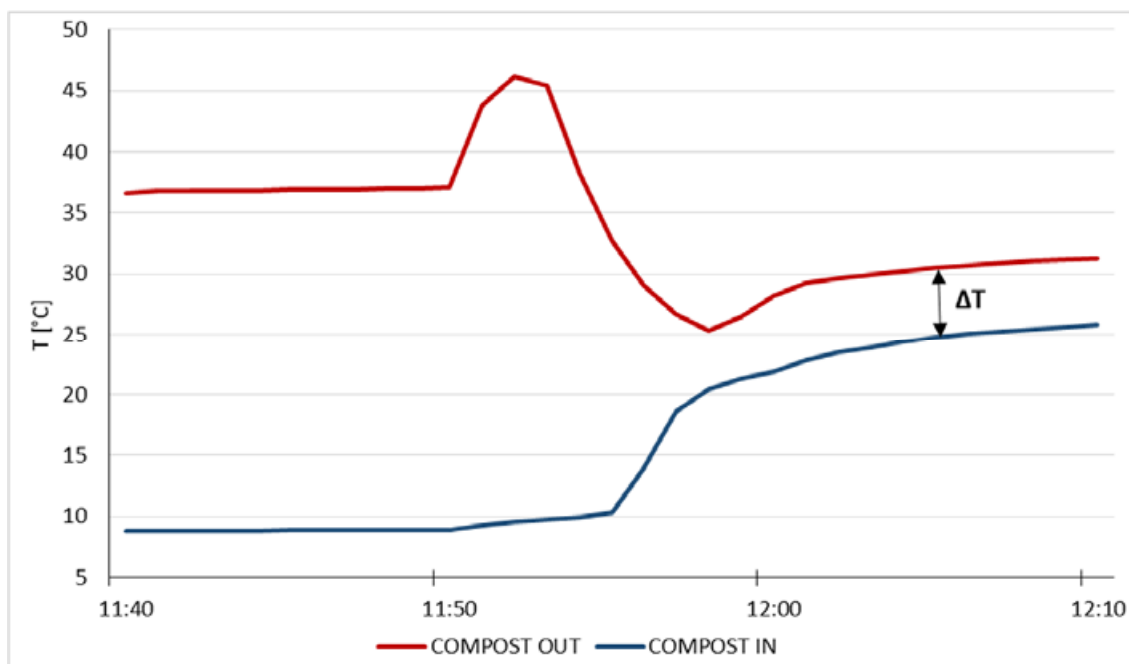
Po zapnutí cirkulace vytekla k čidlu COMPOST OUT voda, která se po celou dobu ohřívala v kompostu. V jeden moment naměřilo čidlo teplotní maximum, kdy přitekla nejteplejší voda z jádra kompostu. Jakmile všechna voda z kompostu protekla, přitekla na čidlo COMPOST OUT voda ohřátá pouze průtokem. Později přitekla voda ohřátá již druhým průtokem kompostem.

Čidlem COMPOST IN nejdříve protékala studená voda z okruhu, ale později přitekla teplá voda, ochlazená o průtok okruhem. Při ohřívání vody ve výměníku dochází k jejímu promíchávání s chladnější vodou v přívodních trubkách.



Graf 4.6 – První testovací cyklus

Žlutá pasáž v grafu 4.6 znázorňuje časový výsek vyobrazený v grafu 4.7.



Graf 4.7 – Detail prvního testovacího cyklu

V grafu je znázorněn rozdíl teplot  $\Delta T$  vody vstupující a vody vystupující z kompostu v momentě, ve kterém určujeme okamžitý výkon reaktoru, tedy v momentě stabilizace průběhu teplot, kdy je voda ve vedení již řádně promíchána. Čím dále od sebe se tyto křivky nacházejí a čím vyšší je tedy rozdíl teplot, tím vyšší je i výkon.

Výkon reaktoru je určen dle množství tepla kompostu předaného teplotonosnému médiu, tedy vodě, za určitý čas.

$$P = \frac{Q}{t}$$

Rovnice 4.1 – Výkon

$P$  [W] ... výkon

$Q$  [J] ... teplo

$t$  [s] ... čas

Předané teplo je druhem energie a určuje změnu teploty daného množství látky o určité měrné tepelné kapacitě.

$$Q = m \cdot c_v \cdot (T_{OUT} - T_{IN})$$

Rovnice 4.2 – Teplo

$m$  [kg] ... hmotnost látky

$c_v$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] ... měrná tepelná kapacita látky

$T_{IN}$  [°C] ... počáteční teplota látky

$T_{OUT}$  [°C] ... konečná teplota látky

Dosazením rovnice 4.2 do vztahu pro výkon získáme rovnici:

$$P = \frac{m \cdot c_V \cdot (T_{OUT} - T_{IN})}{t}$$

Hmotnost vody lze vyjádřit součinem jejího objemu a hustoty.

$$m = V \cdot \rho$$

*Rovnice 4.3 – Hmotnost*

$V [m^3]$  ... objem látky

$\rho [kg \cdot m^{-3}]$  ... hustota látky

Při dosazení hmotnosti vzniká rovnice:

$$P = \frac{V \cdot \rho \cdot c_V \cdot (T_{OUT} - T_{IN})}{t}$$

Objem vody, který proteče průřezem trubky za jednotku času lze označit za objemový průtok.

$$\dot{V} = \frac{V}{t}$$

*Rovnice 4.4 – Objemový průtok*

$\dot{V} [m^3 \cdot s^{-1}]$  ... objemový průtok

Dosazením  $\dot{V}$  do vztahu pro výkon pak dostáváme finální rovnici pro výpočet výkonu termálního reaktoru.

$$P = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_V \cdot (T_{OUT} - T_{IN})$$

Hodnoty pro objemový průtok, hustotu a měrnou tepelnou kapacitu vody jsou:

$$\dot{V} = 4,6 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1} = 7,667 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$c_V = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

V průběhu tří dnů byly spuštěny tři testovací cykly. První z nich trval 15 minut, druhý 30 minut a třetí 45 minut. Pro výpočet okamžitého výkonu byly vždy použity teploty naměřené na konci cyklu, čili po odeznění náběhového režimu systému.

### **1. cyklus – 25. 11. 2016**

doba trvání – 15 minut

$$T_{\text{OUT}} = 30,70 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{IN}} = 24,69 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P = 7,667 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \cdot 4180 \cdot (30,70 - 24,69) = 1926 \text{ W}$$

### **2. cyklus – 26. 11. 2016**

doba trvání – 30 minut

$$T_{\text{OUT}} = 32,38 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{IN}} = 27,50 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P = 7,667 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \cdot 4180 \cdot (32,38 - 27,50) = 1564 \text{ W}$$

### **3. cyklus – 27. 11. 2016**

doba trvání – 45 minut

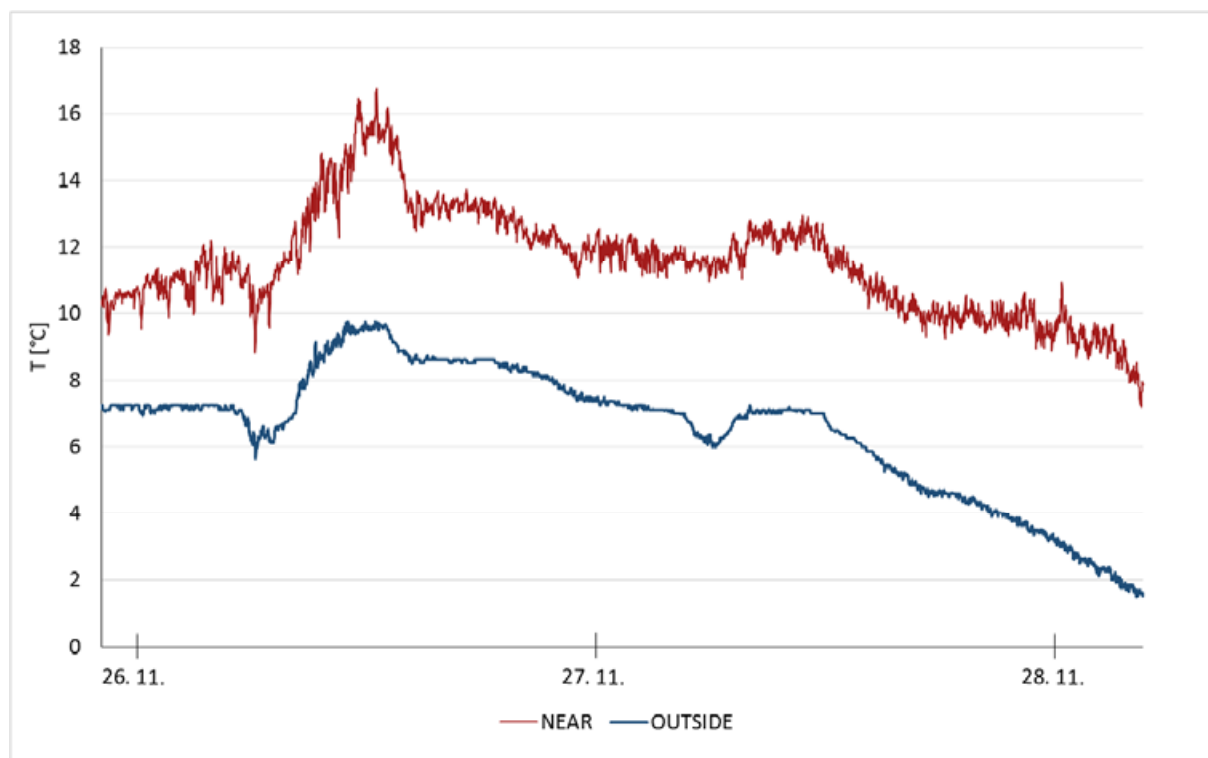
$$T_{\text{OUT}} = 33,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{IN}} = 29,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P = 7,667 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \cdot 4180 \cdot (33,33 - 29,00) = 1388 \text{ W}$$

Výkon termálního reaktoru ve všech třech měřeních překročil 1 kW, avšak dá se předpokládat, že při delší cirkulaci vody, by dále klesal. Pro tuto velikost reaktoru je proto zřejmě vhodné nastavit nižší průtok vody.

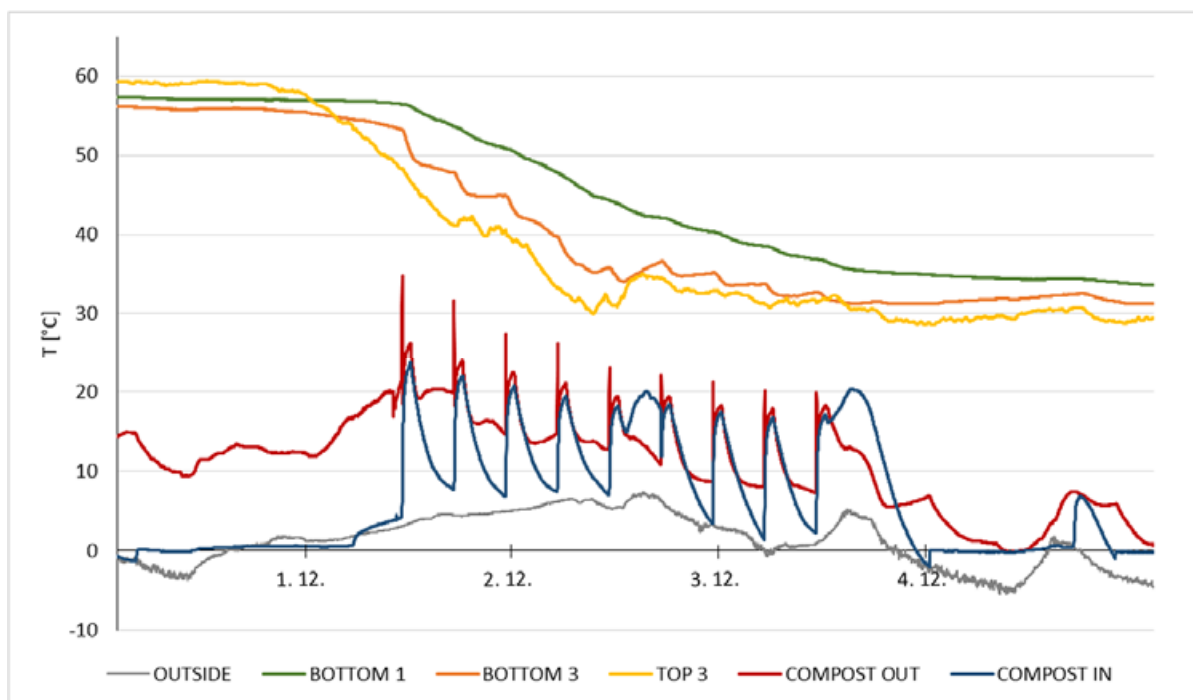
V počátcích měření byly zjišťovány teploty na osmi místech v hmotě kompostu a na jednom místě v jeho blízkosti (čidlo s označením NEAR). Později bylo přidáno čidlo venkovní teploty umístěné dále od kompostu a chráněné před přímým slunečním svitem a povětrnostními podmínkami (čidlo označené OUTSIDE). Z úseku vykresleném v grafu 4.8 je zřejmé, jak moc byl vzduch v okolí kompostu ovlivňován jeho teplem odcházejícím do okolí. Průměrný rozdíl teplot se v tomto časovém rozmezí pohyboval kolem 5 °C.



Graf 4.8 – Srovnání venkovních teplot a teplot v okolí kompostu

Až do 30. 11. nenastaly žádné větší změny. Poté začala teplota na čidle TOP 3 prudce klesat. Dá se předpokládat, že mikrobiální aktivita v této části kompostu začala vlivem nedostatečné vlhkosti prostředí ustávat. Ve stejné době byla spuštěna druhá série testů výkonu. Chladná voda proudící kompostem způsobila tak silný útlum teplot, že termofilní mikroorganismy byly nahrazeny mezofilními a teploty klesly k 30 °C.

Ve dvou případech měřících cyklů (2. a 3. 12.) se teplota na čidle COMPOST IN po skončení cirkulace nesnížila na minimum, ale naopak vystoupala na teplotu vyšší, než po průtoku kompostem. Dá se předpokládat, že teploty byly ovlivněny okolní teplotou a slunečním svitem.



Graf 4.9 – Pokles teploty a druhé testování výkonu

Šestý týden od založení kompostu klesla teplota na čidle BOTTOM 2 na 20,5 °C. Bylo předpokládáno, že mikrobiální aktivita vlivem nedostatečné vlhkosti prostředí ustala a kompost tedy “vyschnul”. Následně bylo do kompostu přidáno dalších 2 000 litrů vody, ale při nízké teplotě okolí, která se v těchto dnech pohybovala kolem bodu mrazu, se ani přesto nepodařilo humifikační proces opět nastartovat.

Začátkem dubna byl z jádra kompostu odebrán vzorek a proveden test vlhkosti. Původní hmotnost vzorku byla 914 gramů a hmotnost po vysušení 330 gramů. Ze vzorku se odpařilo 584 gramů vody, což odpovídá asi 64 procentům vlhkosti.

$$w = \frac{m_{H_2O}}{m}$$

Rovnice 4.5 – Vlhkost vzorku

$$w = \frac{584}{914} = 63,9 \%$$

Dle výsledků testu je zřejmé, že vlhkost kompostu byla dostatečná. Z tohoto důvodu se lze domnívat, že důvodem pro vychladnutí kompostu je spíše přechod z termofilní části fáze rozkladu do mezofilní fáze přeměny.

## 4.3 Vyhodnocení experimentu

Ačkoliv délka termofilní fáze kompostu byla kratší, než se předpokládalo, tedy asi jeden měsíc, v aktivním časovém úseku teploty a měřený krátkodobý výkon dosahovaly očekávaných hodnot pro dané množství a skladbu organického materiálu. Byly získány důležité zkušenosti, které budou využity v dalším výzkumu možnosti odebrání tepla z kompostu.

Důležité příčiny vychladnutí kompostu byly jeho přílišné zatěžování, absence prodyšné obvodové izolace, neregulovaný výpar a s ním spojený únik tepla.

Bylo potvrzeno, že mikroorganismy hůře zvládají skokové teplotní změny. Je proto vhodnější volit menší, avšak konstantní, rychlost proudění teplotnosného média a s tím spojený odebrání výkon. Zejména v menších termálních reaktorech nejsou mikroorganismy při přílišném ochlazení schopny opět dosáhnout termofilní fáze, protože dusíkaté materiály jako koňský hnůj, které slouží rychlému rozehrání kompostu, jsou již rozloženy. Pro delší životnost a stabilní výkon termálního reaktoru by bylo lepší použít větší množství materiálu ke kompostování.

Vychladnutí kompostu lze zabránit i pomocí tepelné izolace. Ta musí mít dostatečnou prodyšnost a zajišťovat snadný přístup kyslíku. V doposud realizovaných projektech jsou za tímto účelem nejčastěji používány slaměné balíky [2].

Dále bylo ověřeno, že vlhkost prostředí je klíčovým kritériem pro správnou funkčnost humifikačních procesů. Pro příští projekty stavby termálního reaktoru by tedy bylo s největší pravděpodobností vhodné použít izolaci, která by zabránila úniku vodní páry a s ním spojenému úniku tepla. Za tímto účelem je možno použít příkryvku, například z plachtoviny, na které by unikající pára zkondenzovala a vzniklá voda odkapala zpět do kompostu.

Intenzitu úniku tepla vypařováním lze posoudit srovnáním venkovních teplot a teplot v blízkosti čidla. Průměrný rozdíl těchto teplot se pohyboval kolem 5 °C.

Při pozorování kompostu bylo také zjištěno, že materiál se při pokračujících rozkladných procesech zhušťuje, čímž výměníky klesnou až o několik desítek centimetrů, v tomto případě o 30 cm. Z tohoto důvodu je vhodnější připojovat vedení teprve po několika dnech od založení reaktoru, aby nedošlo k deformacím trubek.

I přesto, že experiment kvůli krátké životnosti reaktoru částečně nesplnil očekávání, lze jej považovat za úspěšný. Posun z teoretického do praktického studia pomohl mnohem lépe porozumět problematice využití kompostu pro energetické účely. Nově nabyté zkušenosti budou zúročeny v budoucích projektech.



## 5 Termální reaktory ve světě

Ačkoliv termální reaktor je poměrně novou technologií, teplo z rozkladu organické hmoty bylo využíváno již dva tisíce let před naším letopočtem v Číně. Záhony s pěstovanými plodinami byly podloženy chlévským hnojem, který zásoboval kořeny rostlin teplem a dokázal tak prodloužit zemědělskou sezónu až o dva měsíce [2].

Energie kompostu byla populární také od šestnáctého století ve Francii. Pro vytápění rozsáhlých skleníkových záhonů byla používána směs čerstvého a zralého koňského hnoje. Úpravou poměru těchto složek bylo možno ovlivnit teplotu půdy [25].

První ucelenou příručku o využití biomasy nazvanou *Another Kind of Garden* sestavil dle svého výzkumu probíhajícího v letech 1928 až 1981 francouzský agronom Jean Pain. V ní popisuje své poznatky a zkušenosti s odběrem energie kompostu, kterou využíval nejen pro vytápění domu a přípravu teplé užitkové vody, ale i pro výrobu bioplynu pomocí anaerobního rozkladu organické hmoty. Ve své knize uvádí, že pomocí padesátitunové hromady dřevní štěpky a dalšího rostlinného odpadu lze při průtoku 4 litry za minutu ohřívat vodu z 10 na 60 °C, tedy dosáhnout výkonu téměř 14 kW, a to po dobu šesti měsíců bez narušení rovnováhy kompostu. Dále popisuje, že s použitím asi pěti kilogramů dřevní štěpky lze vyprodukovat asi tisíc litrů surového bioplynu v atmosférickém tlaku, jehož výhřevnost po čištění a kompresi odpovídá energii obsažené v asi půl litru kvalitního benzínu. Jean Pain takto získané palivo využil pro pohon spalovacího motoru vozidla se speciálně upraveným karburátorem [27].

Příkladem komerčního využití energie vzniklé při rozkladu biomasy je projekt farmy *Sunset View* v New Yorku. V roce 2010 zde byl postaven systém termálních reaktorů s kondenzačními tepelnými výměníky určený pro vytápění ustájovacích prostor pro dobytek o kapacitě 2 000 krav. Jako hlavní materiál ke kompostování byl používán kravský hnůj. Během počátečního provozu přesahoval výkon systému 57 kW a bylo dosaženo finančních úspor v přepočtu asi 180 000 korun za rok [2].

Autorem prvního oficiálního termálního reaktoru v České republice je Jakub Stejskal. Ve spolupráci s Technickými službami Moravská Třebová sestavil v roce 2015 pokusný termální reaktor podle vzoru Jeana Paina o objemu asi 80 m<sup>3</sup> určený k vyhřívání skleníku. Teploty v kompostu se pohybovaly kolem 50 °C a teplovzdušným potrubím byl do skleníku přiváděn vzduch o teplotě asi 42 °C. V současné době se společnost *GWL Energy z.s.* spoluzaložená Jakubem Stejskalem věnuje komerční instalaci termálních reaktorů pro rodinné domy [30].

## 6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo přiblížit problematiku využití biologického odpadu k produkci energie a to konkrétně využití tepla vznikajícího při rozkladných procesech v kompostu a jeho využití pro přípravu teplé vody. Cílem navazující praktické části práce bylo zpracovat a zhodnotit data naměřená v pilotním projektu termálního reaktoru.

V první kapitole byly popsány výhody kompostování organického odpadu ve srovnání s jeho spalováním či skládkováním. Při kompostování dochází ke vzniku kvalitního hnojiva a k sekvestraci uhlíku, neboli k jeho zabudování do organické hmoty (humusu) a potažmo do půdy. Spalování a skládkování biomasy způsobuje nejen produkci skleníkových plynů a toxických látek, ale plýtvá také její hnojivý potenciál. Byly nastíněny rozdíly mezi běžným kompostováním a kompostováním v termálním reaktoru, a to převážně rozdíly ve skladbě materiálu určeného k rozkladu a délce rozkladného procesu. Využití energie kompostu bylo uvedeno do kontextu udržitelného rozvoje a cirkulární ekonomiky a bylo předvedeno srovnání konvenčního a ekologického produkčního řetězce. Taktéž byly navrženy možné praktické aplikace této metody.

Ve druhé kapitole bylo vysvětleno rozdělení kompostovacího procesu na fázi rozkladu, fázi přeměny a fázi syntézy. Dále byly popsány biochemické procesy probíhající při rozkladu organické hmoty a uvedeny podmínky nutné k dosažení dostatečné aktivity bioty kompostu, tedy obsah kyslíku a důležitých živin, C/N poměr směsi, vlhkost a kyselost prostředí a další. Bylo také vysvětleno, jak docílit prodloužení termofilní fáze rozkladu, která je z hlediska produkce tepla nejvýznamnější a to použitím dřevnatých materiálů, které déle odolávají rozkladu a poskytují proto dlouhodobý zdroj energie pro bakterie.

Třetí kapitola se věnovala termomechanice kompostu a to konkrétně popisu odběru tepla z kompostu, technologii rozvodu odebraného tepla a způsobům přenosu tepla vedením, prouděním a zářením. Byla rozebrána tepelná bilance kompostu, která zahrnuje teplo generované v kompostu, tepelné ztráty, solární zisky a teplo odvedené k dalšímu použití.

Praktická část se skládala z popisu provedeného experimentu stavby termálního reaktoru, výčtu použitého materiálu, technologie rozvodu tepla a grafického zpracování vybraných dat z naměřených hodnot a zhodnocení výsledků měření. Bylo ověřeno, že termální reaktor je schopen dodávat očekávaný výkon, avšak doba jeho funkčnosti je velmi citlivá na větší teplotní výkyvy, a tedy na skokové ochlazení vlivem fázového spouštění cirkulace studené vody. Dále bylo potvrzeno, že izolace je klíčovým faktorem pro udržení potřebné teploty a vlhkosti v kompostu, čímž dochází ke zvýšení množství využitelného tepla.

Poslední kapitola nabídla stručnou historii odběru tepla z kompostu a výčet několika důležitých projektů uskutečněných v České republice i ve světě. Ačkoliv nelze očekávat plošné rozšíření této metody, její další rozvoj ji může v budoucnu zařadit mezi snadno dostupné alternativní zdroje energie.

## Seznam použité literatury

- [1] *Biomeiler* [online]. Hollenthon: Mollay [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.biomeiler.at/>
- [2] BROWN, Gaelan. *The compost-powered water heater: how to heat your water, greenhouse, or building with only compost*. Vermont: Countryman Press, 2014. ISBN 15-815-7194-1.
- [3] PAPPAS, Stephanie. Carbon Dioxide Is Warming the Planet (Here's How). In: *Live Science* [online]. 2017 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/58203-how-carbon-dioxide-is-warming-earth.html>
- [4] BALÁŠ, Marek a Hugo ŠEN. Negativní vlivy energetického využití biomasy - emise. In: *Energie z biomasy, sborník přednášek* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FSI, 2006, s. 21-26 [cit. 2017-02-25]. ISBN 80-214-3310-8.
- [5] HODEK, Tomáš: Je možné separací bioodpadu zvýšit komfort a hygienu v domácnostech?. *Biom.cz* [online]. 2004-05-12 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/je-mozne-separaci-bioodpadu-zvysit-komfort-a-hygieny-v-domacnostech>. ISSN: 1801-2655.
- [6] Compost Chemistry. *CORNELL Composting* [online]. Ithaca (New York): Cornell Waste Management Institute, ©1996 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <http://compost.css.cornell.edu/chemistry.html>
- [7] VÁŇA, Jaroslav: Posuzování vlivu kompostáren na životní prostředí. *Biom.cz* [online]. 2003-08-13 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/posuzovani-vlivu-kompostaren-na-zivotni-prostredi>. ISSN: 1801-2655.
- [8] KOČÍ, Vladimír. *Posuzování životního cyklu Life Cycle Assessment - LCA*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2009. ISBN 9788086832425.
- [9] Co je to zelený produkční řetězec? *Udržitelný rozvoj* [online]. Praha: Rada vlády pro udržitelný rozvoj, 2016 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://udrizitelny-rozvoj.cz/clanky/co-je-to-zeleny-produkni-retezec>
- [10] JAY, James M., Martin J. LOESSNER a David Allen GOLDEN. *Modern food microbiology*. 7th ed. New York: Springer, ©2005. ISBN 03-872-3180-3.
- [11] GÖRNER, Fridrich a Ľubomír VALÍK. *Aplikovaná mikrobiológia požívatín*. Bratislava: Malé centrum, 2004. ISBN 80-967-0649-7.

- [12] KÁRA, Jaroslav, Zdeněk PASTOREK a Antonín JELÍNEK. Kompostování zbytkové biomasy. In: *Biom.cz* [online]. Praha, 2002 [cit. 2017-05-01]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kompostovani-zbytkove-biomasy>
- [13] Compost Microorganisms. *CORNELL Composting* [online]. Ithaca (New York): Cornell Waste Management Institute, ©1996 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://compost.css.cornell.edu/microorg.html>
- [14] VÁŇA, Jaroslav: Kompostování odpadů. In: *Biom.cz* [online]. Praha, 2002 [cit. 2017-01-02]. ISSN: 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kompostovani-odpadu>.
- [15] DICKSON, Nancy, Thomas RICHARD a Robert KOZLOWSKI. *Composting to Reduce the Waste Stream: A Guide to Small Scale Food and Yard Waste Composting*. Repr. with rev. New York: Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service (NRAES), 2000, 44 s. ISBN 09-358-1759-X.
- [16] The Effect of Lignin on Biodegradability. *CORNELL Composting* [online]. Ithaca (New York): Cornell Waste Management Institute, ©1996 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://compost.css.cornell.edu/calc/lignin.html>
- [17] DRÁBKOVÁ, Petra. *Analýza moderních technologií ekologického kompostování*. Brno, 2012. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta. Vedoucí práce Prof. Ing. Bořivoj Groda, DrSc.
- [18] ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, Jana. *Mikrobiologie v technologii vod*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2004. ISBN 80-708-0534-X.
- [19] KOOLMAN, Jan a Klaus-Heinrich RÖHM. *Barevný atlas biochemie*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-2977-0.
- [20] Compost Physics. *CORNELL Composting* [online]. Ithaca (New York): Cornell Waste Management Institute, ©1996 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://compost.css.cornell.edu/physics.html>
- [21] Composting. *Clemson Cooperative Extensions* [online]. South Carolina: Clemson University, 1999 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [http://www.clemson.edu/extension/hgic/plants/other/compost\\_mulch/hgic1600.html](http://www.clemson.edu/extension/hgic/plants/other/compost_mulch/hgic1600.html)
- [22] PLÍVA, Petr. *Zakládání, průběh a řízení kompostovacího procesu*. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2006. ISBN 80-868-8411-2.
- [23] Water - Thermodynamic Properties. *The Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: [http://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d\\_162.html](http://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html)

- [24] G KHATER, El Sayed. Mathematical Model of Compost Pile Temperature Prediction. *Journal of Environmental*. 2014, 4(6), 2. DOI: 10.4172/2161-0525.1000242. ISSN 21610525.
- [25] SMITH, Matthew M., John D. ABER a Robert RYNK. Heat Recovery from Composting: A Comprehensive Review of System Design, Recovery Rate, and Utilization. In: *Compost Science & Utilization* [online]. Taylor & Francis, 2016, s. 2 [cit. 2017-03-21]. DOI: 10.1080. ISSN 2326-2397. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1065657X.2016.1233082>
- [26] Výpočet vlastností vlhkého vzduchu. *Qpro* [online]. Chlumeck nad Cidlinou: Vopálka, ©2006-2017 [cit. 2017-22-03]. Dostupné z: <http://www.qpro.cz/Vlastnosti-vlhkeho-vzduchu>
- [27] PAIN, Ida a Jean PAIN. *The Methods of Jean Pain: Another Kind of Garden*. Draguignan: Ancienne Imprimerie NEGRO, 1972.
- [28] RECKNAGEL, Helmut, Heinz SPRENGER a Ernst R. SCHRAMEK. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 2000*. 69. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 1999. ISBN 978-3486262155.
- [29] Nedostatky při napouštění a odvězdušňování soustav. *TZB-info* [online]. Radim Hečko, 2010 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-vytapani/6522-nedostatky-pri-napousteni-a-odvzdusnovani-soustav>
- [30] *Vytápění kompostem* [online]. Praha: Jakub Stejskal, ©2014 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.vytapenikompostem.cz/>

## Seznam příloh

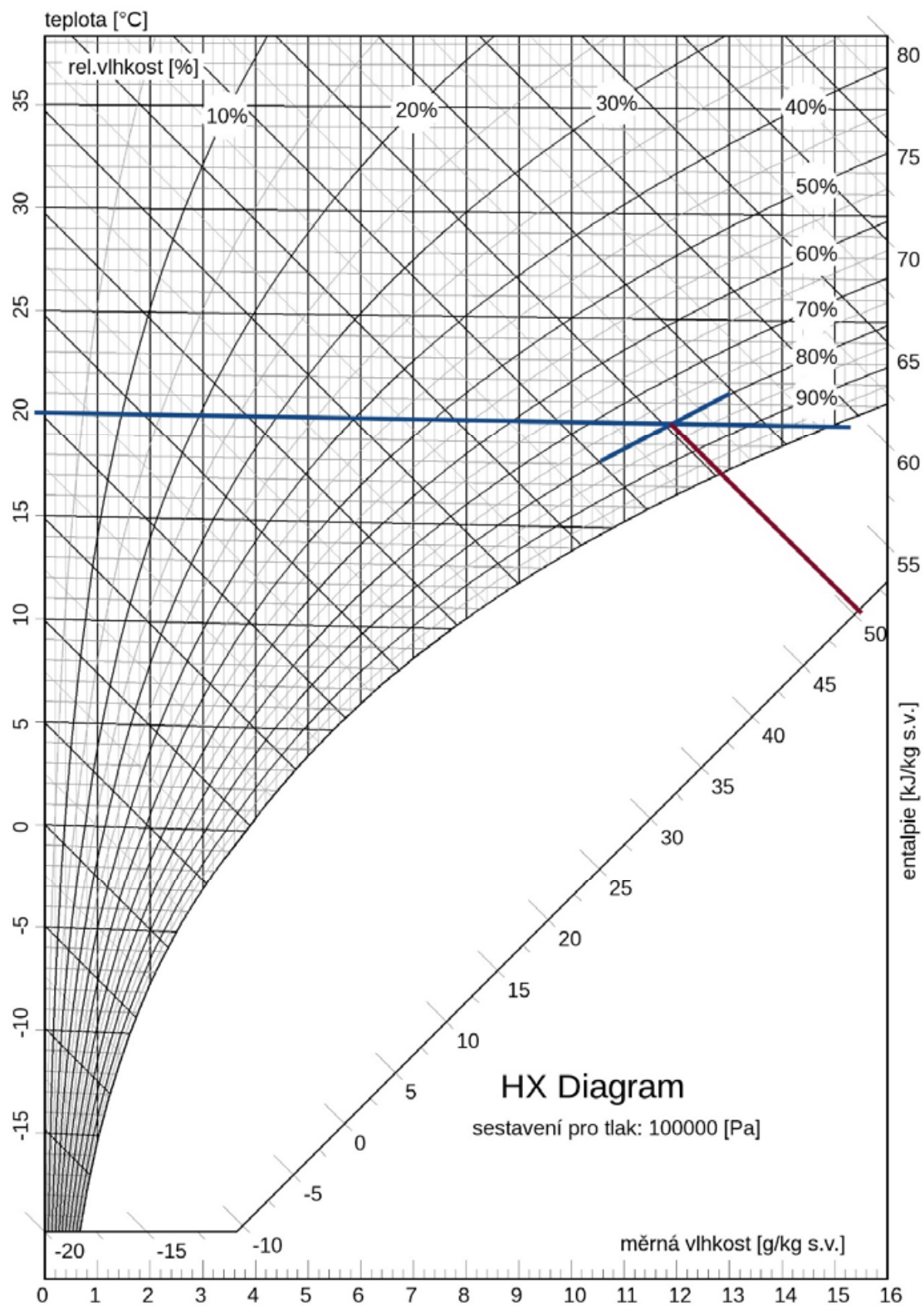
Příloha A – Diagram vlastností vlhkého vzduchu [26]

Příloha B – Fotografie termálního reaktoru v Milovicích u Mikulova (archiv autora)

Příloha C – Fotografie teplovodní soustavy (archiv autora)

Příloha D – Fotografie tepelného výměníku a teplotních čidel (archiv autora)

Příloha A – Diagram vlastností vlhkého vzduchu





Příloha B – Fotografie termálního reaktoru v Milovicích u Mikulova



Příloha C – Fotografie teplovodní soustavy





Příloha D - Fotografie tepelného výměníku a teplotních čidel

